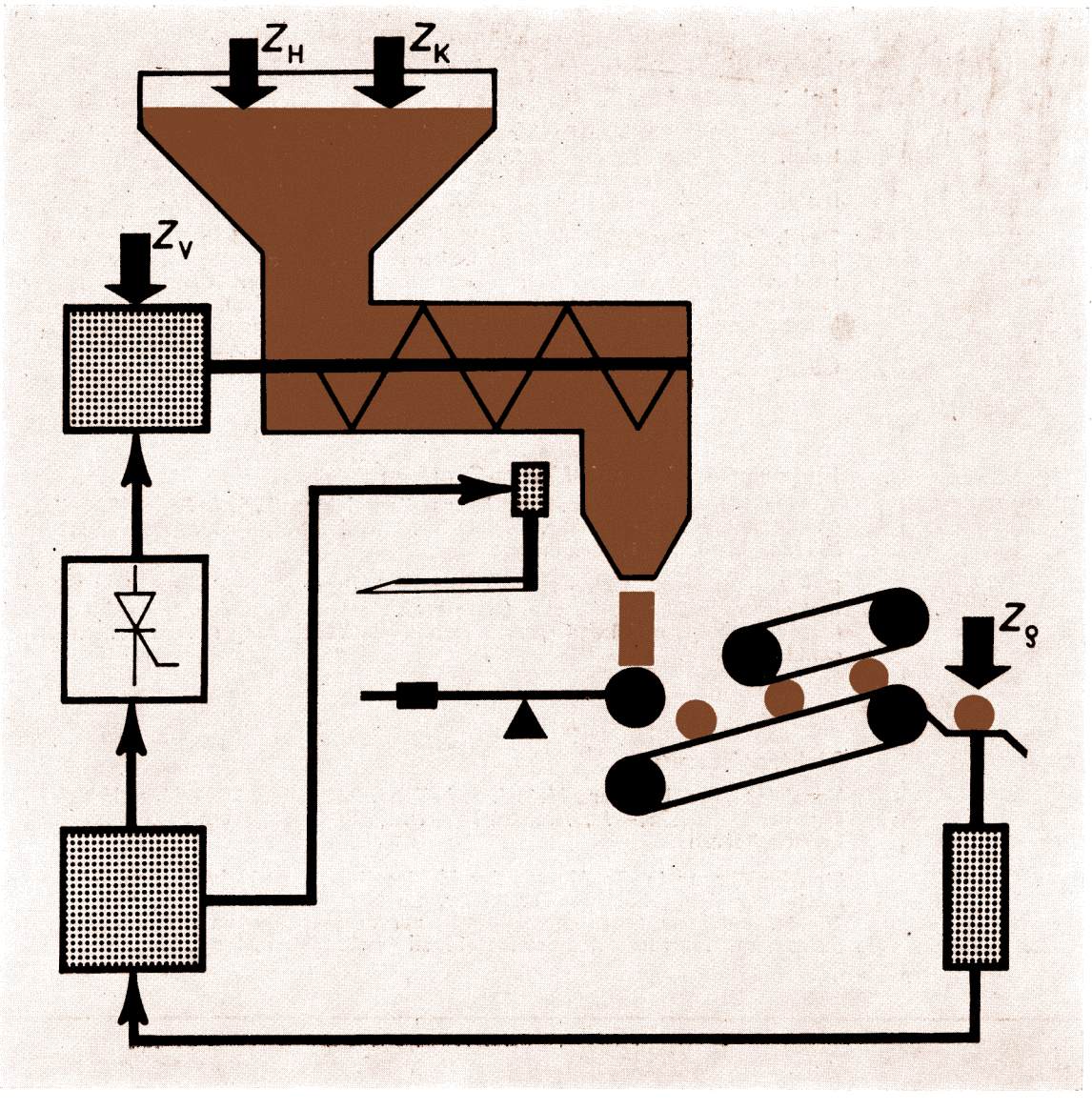
# mst

3
1988

# messen·steuern·regeln




VEB
Verlag Technik
Berlin
EVP: 4,- M

# Auslieferung in diesen Tagen durch den Fachbuchhandel

### Funktionseinheiten der Automatisierungstechnik

elektrisch · pneumatisch · hydraulisch. Von einem Autorenkollektiv. Herausgegeben von Prof. Dr. sc techn. Heinz Töpfer und Prof. Dr. sc. phil. Werner Kriesel. 5., stark bearbeitete Auflage. 588 Seiten, 492 Bilder, Kunstleder, DDR 40,—M, Ausland 52,— DM. Bestellangaben: 5536052/Töpfer, Funktion

In diesem Werk werden die gerätetechnischen Mittel, wie sie zur Lösung praktischer Automatisierungsaufgaben erforderlich sind, in ihrer Gesamtheit systematisch und praxisnah dargestellt. Dabei werden moderne Lösungen für Meß-, Steuer- und Regelaufgaben bis hin zu Prozeßrechnereinheiten und Mikroprozessoren zugrunde gelegt, wie sie in der DDR und auf dem internationalen Markt typisch sind.
Bei der umfassenden Bearbeitung wurden auch Entwicklungen berücksichtigt wie 16- und 32-Bit-Mikrorechnersysteme, Einchipmikrorechner und Signalprozessoren, Sensoren und Optoelektronik.

### VEM-Handbuch Prozeßsteuerungstechnik

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Dr.-Ing. Kurt Grubba. 2., durchgesehene Auflage. 312 Seiten, 164 Bilder, 72 Tafeln, Kunstleder, DDR 32,— M, Ausland 42,— DM. Bestellangaben: 5538867/VEM-Handb. Prozeßsteuerung

Es werden verbindungsprogrammierte und speicherprogrammierbare binäre Steuerungen zur Automatisierung technologischer Prozesse behandelt. Nach einer knappen Darstellung von Grundlagen der Steuerungstechnik wird die gerätetechnische Basis erläutert. Ausführungen zur Systemtechnik, zum Aufbau, zur Entwurfsmethodik und technischen Realisierung bis hin zur Inbetriebsetzung von Prozeßsteuerungen bilden den Hauptteil.

VEB
VERLAG
TECHNIK
BERLIN

### Leistungselektronik

Hochschullehrbuch. Von Prof. em. Dr.-Ing. habil. Rudolf Lappe, Prof. Dr. sc. techn. Harry Conrad und Prof. Dr. sc. techn. Manfred Kronberg. 1. Auflage. 424 Seiten, 301 Bilder, 21 Tafeln, Kunstleder, DDR 32,— M, Ausland 85,— DM. Bestellangaben: 5537231/Lappe, Leistung

Das Lehrbuch vermittelt einen Einblick in die physikalischen Grundlagen der Leistungs-Halbleiterventile (Dioden, Thyristoren, Transistoren), der Stromrichterschaltungen (insbesondere der Gleichrichter und der Wechselrichter), der Steuergeräte usw. Die für die optimale Auslegung der Ventile und Schaltungen benötigten wichtigsten Formeln werden abgeleitet. In jedem Abschnitt wird durch Rechenbeispiele, Beschreibungen der Einsatzgebiete der Stromrichter sowie durch Übungsaufgaben der Zusammenhang zwischen Theorie und Praxis aufgezeigt.

### Netzwerkanalyse mit Mason-Graphen

Von Dr.-Ing. Ulrich Mende. Reihe Informationselektronik. 1. Auflage. 156 Seiten, 64 Bilder, 8 Tafeln, Broschur, DDR 16,50 M, Ausland 24,— DM. Bestellangaben: 5537346/Mende, Netzwerkanalyse

Der Autor vermittelt eine topologische Methode zur Berechnung elektrischer und elektronischer Netzwerke. Diese Methode beruht auf der Anwendung des Mason-Graphen und kann auch vorteilhaft in Verbindung mit Mikrorechnern genutzt werden.

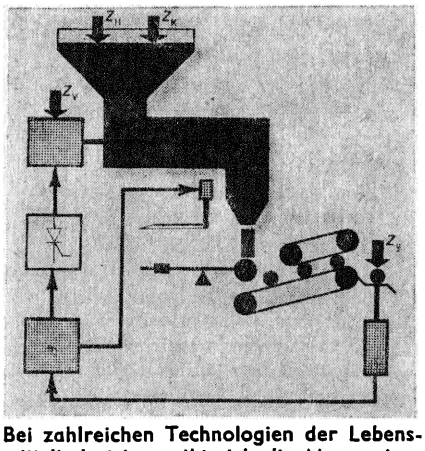
### Elektrogitarren

Von Dipl.-Phys. Eberhard Meinel. 1. Auflage. 224 Seiten, 232 Bilder, 15 Tafeln, Pappband, DDR 23,— M, Ausland 38,— DM. Bestellangaben: 5537354/Meinel, Elektrogitarren

Eine Einführung in die Akustik der Elektrogitarren und akustischen Gitarren sowie der dazugehörigen Verstärker, Lautsprecher, Boxen und wichtigsten Effekte. Gegeben werden auch Hinweise zur Verbesserung und zum Umbau des Instrumentariums im Sinne des individuell gewünschten Klangbildes.

# messen·steuern·regeln

Wissenschaftlich-technische
Zeitschrift für die
Automatisierungstechnik

Bei zahlreichen Technologien der Lebensmittelindustrie ergibt sich die Masse eines Stückguts durch Volumenportionierung pastöser Medien. Störgrößen erfordern dabei Maßnahmen zur Massestabilisierung. Traditionelle technologische Verfahren — unser Titelbild zeigt als Beispiel das Prinzip einer Brotteigteil- und Wirkmaschine — berücksichtigen nur unzureichend steuerungstechnische Aspekte. Zur Automatisierung dieser Verfahren sind geeignete Stellgrößen zu wählen und konstruktive Änderungen zur Verbesserung der Steuerbarkeit vorzunehmen. Unser Beitrag auf S. 101 informiert über Probleme, die sich beim genannten Beispiel ergeben, und deren Lösung.

Titelgrafik: *G. Schwesinger*


Herausgeber:

Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

Redaktionsbeirat:

Dr. rer. nat. A. Borgwardt, Prof. Dr. sc. techn. G. Brack, Dipl.-Ing. H.-H. Ehlert, Prof. Dr. sc. techn. W. Fritzsch, Prof. Dr. sc. techn. H. Fuchs, Dr. rer. nat. H. Gena, Dipl.-Ing. H. Gottschalk, Dr.-Ing. K. Hilscher, Prof. Dr.-Ing. habil. D. Hofmann, Dipl.-Ing. K. Keller, Dr.-Ing. G. Meister, Dr.-Ing. J. Müller, Prof. Dr. sc. techn. R. Müller, Prof. Dr. sc. techn. P. Neumann, Prof. Dr.-Ing. S. Pilz, Prof. em. Dr. sc. techn. Dr.-Ing. E. h. K. Reinisch, Prof. Dr. sc. techn. W. Richter, Dr.-Ing. H. Schulze, Prof. Dr. sc. techn. H. Töpfer, Prof. Dr. sc. oec. G. Viehweger, Prof. Dr. sc. techn. J. Wernstedt



**3**

31. Jahrgang
März 1988

VEB
VERLAG TECHNIK


## AUFSÄTZE


ISSN 0026-0347



98 *W. Badelt, S. Hauser* und *P. Pillat*
**Parameterschätzung bei aktiver und/oder passiver Experimentation unter Nutzung von Analog- und Digitalrechentechnik**

101 *O. Groll*
**Rechnergestützte Optimierung der Arbeitsweise einer Brotteigteil- und Wirkmaschine unter automatisierungstechnischen Aspekten**

105 *G.-H. Geitner* und *H. Krug*
**Zur Anwendung des Betragsoptimums für digital geregelte Gleichstromantriebe**

111 *G. Brack* und *F. Clemens*
**Zur Lösung der dynamischen Zustandsgleichung mit substantiell verteilten Zustandsgrößen**

115 *A. Scholz* und *G. Schulz*
**Strukturelle Analyse von Mehrgrößensystemen als Vorstufe der Berechnung strukturbeschränkter Regler**

119 *E.-G. Woschni*
**Konsequenzen einer Erhöhung der Verarbeitungsbreite von Mikrorechnern beim On-line-Einsatz**

121 *W. Barth, K.-J. Müller, F. Reichel* und *G. Zeun*
**Robotersteuerung IRS 713 (Teil 1)**

126 **KURZBEITRÄGE**

129 **AUS DER ARBEIT DER WGMA**

130 **PERSÖNLICHES**

132 **TAGUNGEN UND KOLLOQUIEN**

137 **DISSERTATIONEN**

139 **BUCHBESPRECHUNGEN**

144 **NEUE BÜCHER AUS DER UDSSR**

3. US. **VORSCHAU UND KURZINFORMATIONEN**

*W. Badelt; S. Hauser; P. Pillat*

# Parameterschätzung bei aktiver und/oder passiver Experimentation unter Nutzung von Analog- und Digitalrechentechnik

## 0. Einleitung

In den 60er und 70er Jahren wurde eine Vielzahl von Methoden und Algorithmen zur experimentellen Parameterschätzung entwickelt, optimiert und für die praktische Nutzung erschlossen [1] und [2]. Dabei zeigte sich, daß für gestörte Systeme (Auftreten von Störungen im Meßkanal, von nicht meßbaren Eingangsgrößen) Modellmethoden, bei denen die Übereinstimmung von Modell- und Systemverhalten durch ein Abgleichen des Modells erzielt wird (z. B. Minimierung eines Gütefunktionals), die besten Ergebnisse liefern. Die Verwendung eines aktiven, d. h. vom Experimentator vorgegebenen und von außen eingespeisten Eingangssignals erhöht die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen. Zur Lösung dieser Identifikationsaufgabe entstanden umfangreiche Programmpakete für Digitalrechner. Die Nutzung dieser Mittel setzt aber eine leistungsfähige Rechentechnik (häufig Großrechner) voraus und erfordert beim Anwender Spezialkenntnisse für die Handhabung dieser Mittel. Dazu gehören z. B. die Festlegung von Startwerten bei adaptiven Algorithmen, Kenntnisse über das Auftreten von möglichen Nebenextrema in Gütefunktionen und auch die Beurteilung der erzielten Ergebnisse.

Andererseits zeigt sich, daß bei Einbeziehung des Operateurs in den Identifikationsalgorithmus und der Gewährleistung einer guten, auf die Anforderungen zugeschnittenen Mensch-Maschine-Kommunikation schon mit einer verhältnismäßig einfachen Gerätetechnik praktikable Ergebnisse erzielt werden können, ohne beim Anwender tiefere Spezialkenntnisse auf dem Gebiet der Identifikation vorauszusetzen. Deshalb sollten einfache Verfahren zur Parameterschätzung, die auf dem Einsatz der Analogrechentechnik beruhen und denen sich durch die enorme Entwicklung der Mikrorechentechnik neue Möglichkeiten bieten, weiterhin ausgebaut und mit Erfolg genutzt werden. Eine in diesem Sinne genutzte Geräte- und Programmtechnik sowie ihre Anwendung an einem Beispiel sind Gegenstand dieses Beitrags.

## 1. Parameterschätzung mit Parallelmodell und Handabgleich

Das zu untersuchende technische System wird durch ein aktives Testsignal $u_1$ beaufschlagt (Bild 1). Mittels eines Mikrorechners mit zugehöriger Prozeßperipherie werden das Testsignal $u_1$, weitere Eingangssignale $u_2, \ldots, u_n$ und das Ausgangssignal $y$ erfaßt und gespeichert. Das Modell des Systems wird auf einem Analogrechner nachgebildet. Die Struktur des Modells ergibt sich aus einer theoretischen Prozeßanalyse und ist im Rahmen der technischen Realisierungsmöglichkeiten frei wählbar. Selbst ein Offset des Ausgangssignals (Nullpunktverschiebung) oder dessen

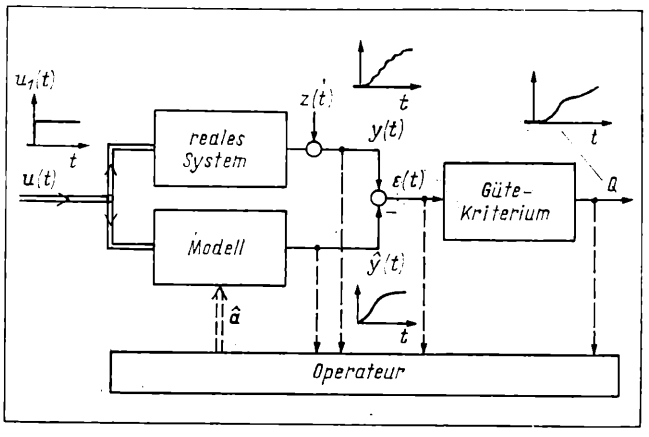



**Bild 1. Identifikationsprinzip**

$u(t) = (u_1(t), \ldots, u_n(t))$ Vektor der Eingangssignale; $y(t)$ Systemausgangssignal; $\hat{y}(t)$ Modellausgangssignal; $\hat{a}$ Parametervektor des Modells; $z(t)$ nicht meßbare Störgröße; $\varepsilon(t)$ Ausgangsfehler; $Q$ Gütewert, z. B. $Q(t) = \int_0^t \varepsilon^2(\tau)\,d\tau$
---> visuelle Überwachung; - - - > Handabgleich

Trend (konstantes Weglaufen des Arbeitspunktes) können als zu identifizierende Parameter vorgegeben werden. Damit kann die über das technische System vorhandene A-priori-Information weitgehend genutzt werden.

Für den Abgleich des Modells werden die Eingangssignale $u$ mit geeigneter Zeittransformation auf das Modell aufgeschaltet und das so entstandene Modellausgangssignal $\hat{y}$ auf einem Sichtgerät (Mehrkanaloszilloskop) zusammen mit dem gemessenen Ausgangssignal $y$ dargestellt. Der Abgleich der Parameter $\hat{a}$ erfolgt von Hand durch Verstellen von Koeffizientenpotentiometern am Analogrechner, bis eine — nach dem visuellen Eindruck des Operateurs — bestmögliche Übereinstimmung von Modell- und Systemausgangssignal erreicht ist.

Wesentlich für dieses Vorgehen ist eine angepaßte Mensch-Maschine-Kommunikation. Eine Repetierfrequenz für die Signaldarstellung größer als 5 Hz (stehendes Bild) und der Abgleich über analoge Potentiometer bieten hierfür eine gute Voraussetzung (angepaßte Reaktionszeit der Anlage auf Aktivitäten des Operateurs). Auf diese Weise können (nach den Erfahrungen der Verfasser) in Abhängigkeit von Modellstruktur und Parameterkonfiguration etwa vier bis sieben Parameter bestimmt werden.

Der Operateur sollte die Identifikation mit dem gleichen Datenmaterial mehrfach, aber bei unterschiedlichen Startwerten für die Parameter $\hat{a}$ durchführen. Zur Unterstützung der Arbeit des Operateurs ist es nützlich, den Wert des Gütekriteriums $Q$[1]) als Funktion der Zeit auf dem Analogrechner zu berechnen und zusätzlich auf dem Sichtgerät darzustellen. Damit wird auch eine stärkere Bewertung eines bestimmten Ausschnittes aus dem Zeitverlauf (z. B. Beginn des Übergangsvorganges oder für die Statik der bestimmende Endwert) ermöglicht.

Dr.-Ing. *Wolfgang Badelt* (45) studierte von 1960 bis 1966 Schwachstromtechnik/Regelungstechnik an der TU Dresden. Seit 1967 Assistent bzw. Oberassistent am WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerung der Sektion Informationstechnik der TU Dresden. 1973 Promotion A.

Dr.-Ing. *Siegfried Hauser* (48) studierte von 1958 bis 1964 Schwachstromtechnik/Regelungstechnik an der TU Dresden. Seit 1964 Assistent bzw. Oberassistent am WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerung der Sektion Informationstechnik der TU Dresden. 1972 Promotion A.

Dipl.-Ing. *Peter Pillat* (30) studierte von 1978 bis 1983 Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik an der TU Dresden. Von 1983 bis 1987 Assistent am WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerung der Sektion Informationstechnik der TU Dresden. Seit 1987 Mitarbeiter für MSR-Technik im SFT des VEB Kombinat ILKA Luft- und Kältetechnik. 1987 Promotion A.

[1]) Das Gütekriterium muß gerätetechnisch leicht realisierbar sein, z. B.

$$Q(t) = \int_0^t |\varepsilon(\tau)|\,d\tau .$$

In Abhängigkeit von den Randbedingungen sind mehrere niveaugestufte Realisierungsmöglichkeiten (siehe Abschn. 2.) einsetzbar:

- Bei rein aktiver Experimentation und Realisierbarkeit der Eingangssignale $u$ auf dem Analogrechner kann auf den Einsatz eines Mikrorechners verzichtet werden.
- In den meisten Fällen wird sich das vorn beschriebene Zusammenwirken von Analog- und Mikrorechner, wobei bezüglich des Bedienkomforts unterschiedliche Niveaustufen sinnvoll sein können, anbieten.
- Ein Ersatz des Analogrechners zur Modellrealisierung durch den Mikrorechner ist beim heutigen Stand der Technik nicht sinnvoll, da hier aufgrund der meist mehrere Sekunden dauernden Rechenzeit eine Grundvoraussetzung für diese Methode, die erforderliche Mensch-Maschine-Kommunikation (stehendes Bild sowie sofortige Darstellung der Wirkung von Parameteränderungen), nicht realisierbar ist.

Die Güte des erzielten Modells kann nur anwendungsbezogen (z. B. Güte des Entwurfsergebnisses) überprüft werden. Wenn sie den Anforderungen nicht genügt, gibt es mehrere Wege zur Modellverbesserung:

- Anwendung von leistungsfähigeren Methoden unter Verwendung des gleichen Datenmaterials und Nutzung der hier erzielten Parameterwerte als Startwerte
- Versuche, mit einer anderen Modellstruktur zu günstigeren Ergebnissen zu kommen
- Durchführung neuer Experimente mit weiteren Testsignalen und gleichem Auswerteverfahren
- Identifikation im geschlossenen Regelkreis
  Der Regler müßte dann mit auf dem Analogrechner nachgebildet werden.

Die hier vorgestellte Methode gestattet, die notwendige Technik komplett mit vor Ort zu nehmen, so daß die Identifikation unmittelbar zusammen mit den Experimenten durchgeführt werden kann und somit die Nachteile der Off-line-Auswertung praktisch nicht zum Tragen kommen.

## 2. Gerätetechnische Realisierung

*1. Variante*

Im einfachsten Fall wird das aus dem Experiment gewonnene Systemausgangssignal $y$ als Meßwertfolge auf eine Klarsichtfolie aufgezeichnet und diese auf dem Sichtgerät befestigt. Das verwendete Testsignal wird auf dem Analogrechner generiert und damit das Modell beaufschlagt. Der Abgleich ist so mit einem visuellen Vergleich beider Signalverläufe möglich (Bild 2, Verbindung (1)).
Die interne Zeitbasis für den repetierenden Betrieb am Analogrechner wird so eingestellt, daß auf dem Oszilloskop ein stehendes Bild erzeugt wird (Wiederholfrequenz etwa 5 ... 20 Hz).

*2. Variante*

In die experimentelle Modellsuche wird ein Mikrorechner mit einbezogen. Dieser verfügt in seinem Speicher über das Systemausgangssignal $y$ als Folge diskreter Werte $y_i$ ($i = 1, \ldots, n$) und gibt diese auf einen zweiten Kanal des Sichtgeräts aus (Bild 2, Verbindungen (1), (2)).
Zusätzlich können jetzt auch das bei der Experimentation verwendete Testsignal bzw. weitere erfaßte Systemeingangsgrößen $u$ durch den Mikrorechner bereitgestellt und auf das Analogrechnermodell aufgeschaltet werden. Damit ist auch die Auswertung von passiven bzw. aktiv-passiven Experimenten möglich.
Die Betriebsregimesteuerung des Analogrechners (Anfangswertübernahme/Rechnen/Halt) übernimmt jetzt der Mikrorechner. Durch günstige Programmorganisation wird unter Beachtung einer Mindestmeßwertanzahl eine minimale Ausgabezeit erreicht, deren Dauer über eine Echtzeituhr gemessen und für die durchzuführende Zeittransformation bei der Parameterbestimmung zur Verfügung steht.
Der visuelle Vergleich beider Kurvenverläufe gestaltet sich jetzt günstiger (kein Sichtfehler infolge Parallaxe). Zusätzlich wird auf dem Analogrechner ein Gütekriterium nachgebildet, dessen Verlauf auf einem weiteren Kanal des Sichtgerätes dargestellt werden kann. Aus Realisierungssicht erweist sich das Integral

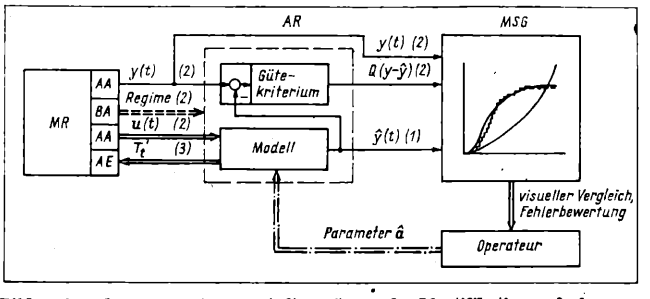



**Bild 2. Anordnung zur niveaugestuften Lösung der Identifikationsaufgabe**
*MR* Mikrorechner mit: Analogausgabe *AA*, Analogeingabe *AE*, Binärausgabe *BA*; *AR* Analogrechner, z. B. MEDA; *MSG* Mehrkanalsichtgerät, z. B. OPX 600 A (TESLA)

der Fehlerbeträge

$$Q(t) = \int_0^t |y(\tau) - \hat{y}(\tau)| \, d\tau$$

als besonders günstig.
Der Verlauf des Gütekriteriums kann durch den Operateur entsprechend bewertet werden, so z. B. die unterschiedliche Wichtung des Fehleranteils bei der Bestimmung der großen und kleinen Zeitkonstanten sowie des Übertragungsfaktors des modellierten Systems.

*3. Variante*

Der Mikrorechner wird vorteilhaft für die Simulation der durch den Analogrechner schwer zu realisierenden Laufzeiten eingesetzt, indem die Eingangswertefolgen $u_i$ gegenüber der Ausgangswertefolge $y_i$ zeitlich verschoben werden. Somit können ganzzahlige Vielfache der gewählten Tastzeit erreicht werden. Für die Modellanpassung ist es günstig, auch die Einstellung der Laufzeit über Potentiometer am Analogrechner vornehmen zu können. Deshalb werden über eine Analogeingabe nach jedem Ausgabezyklus entsprechende Potentiometerstellungen abgefragt und bei Veränderung die zugehörigen Wertefolgen verschoben (Bild 2, Verbindungen (1) bis (3)).
Zusätzlich kann der Mikrorechner den Operateur von Auswerteaufgaben entlasten, indem über weitere Analogeingabekanäle die Potentiometerstellungen der einzelnen Parameter abgefragt, die zur vorgenommenen Zeittransformation und Amplitudennormierung gehörenden Rückrechnungen durchgeführt werden und so die Ergebnisdarstellung in Systemgrößen erfolgen kann. Da die Experimentation am Prozeß zumeist auch mikrorechnergesteuert abläuft, ist es selbstverständlich, das Datenmaterial so zu archivieren (Kassette, Diskette, Lochband), daß es beim Prozeß der Modellermittlung direkt vom Rechner verarbeitet werden kann.

## 3. Programmtechnische Gestaltung

Wesentliche Kriterien für die Programmgestaltung sind:

- die Lösung des Kompromisses maximale Geschwindigkeit der Ausgabe (stehendes Oszillografenbild) und minimale Tastzeit (feine Stufung der darzustellenden Kurven)
- das Ziel, die Kommunikation möglichst einfach zu gestalten, damit der Experimentator sich voll auf die eigentliche Parametersuche konzentrieren kann.

Für die Ausgabeorganisation gibt es zwei Möglichkeiten:

a) Vorgabe eines festen Zeittaktes und interruptgesteuerte Auslösung der Werteausgabe zu jedem Tastzeitpunkt
b) Ausgabe der Werte nacheinander ohne Zeitbegrenzung (Interruptsperre setzen!), wobei die Dauer für einen Zyklus gemessen oder berechnet werden muß.

Es erweist sich als sinnvoll, die auszugebenden Werte im 2-byte-Festkommaformat in der Reihenfolge im RAM abzulegen, wie die Ausgabe erfolgt. In dem realisierten Programm wurde aufgrund der höheren Ausgabefrequenz die Variante b) vorgezogen; bei einer angestrebten Rechenzeit von etwa 100 ms (Regime Rechnen, quasiparallele Ausgabe aller Wertefolgen) lassen sich etwa 800 Werte ausgeben[2]). Somit sind bei vier Signalen noch

jeweils 200 Werte möglich. Das genügt für die Darstellung am Sichtgerät völlig. Zu beachten ist, daß bei der gleichzeitigen Behandlung von mehreren Wertefolgen die Ausgabe eines Wertetupels nicht streng parallel, sondern nacheinander erfolgt und damit ein Fehler entsteht, der jedoch bei der hier angesetzten Meßwertanzahl und Auflösung auf dem Bildschirm verschwindet.

Der Mikrorechner steuert über Binärausgaben das Regime des Analogrechners (Anfangswertübernahme, Rechnen, Halt). Um den zeitlichen Ablauf der Ausgabe nicht zu stören, werden die Analogeingabekanäle der Potentiometerschaltungen für die Laufzeiten in der Wartezeit zwischen Anfangswertübernahme und Rechnen (etwa 10 ms) abgefragt, bei signifikanter Änderung erfolgt eine Umorganisation des Datenspeichers durch Verschieben der Meßwertfolgen gegeneinander. Damit wird der Nutzer davon befreit, gleichzeitig Mikro- und Analogrechner zu bedienen, nach einmaligem Start des Programmsystems konzentrieren sich die wesentlichen Handlungen auf den Potentiometerabgleich am Analogrechner.

## 4. Beispiel

Anhand der Modellbildung für einen Warmwasserboiler soll die Vorgehensweise noch einmal verdeutlicht werden [3]. Das technologische Schema ist im Bild 3a angedeutet. Ausgangsgröße $y$ des betrachteten Systems ist die Vorlauftemperatur $T_{BV}$, Eingangsgrößen sind die stellbare Heizleistung $P_B$ ($u_1$) und die (nicht stellbare) Rücklauftemperatur $T_{BR}$ ($u_2$); weitere Einflüsse (z. B. Massenstrom, Wärmeabgabe an die Umgebung) seien hier vernachlässigt.

Zur Ermittlung des Modells wird ein aktiv-passives Experiment durchgeführt, d. h. bei sprungförmiger Veränderung der Heizleistung $u_1$ wird das Übergangsverhalten $y = f(t)$ gemessen, die

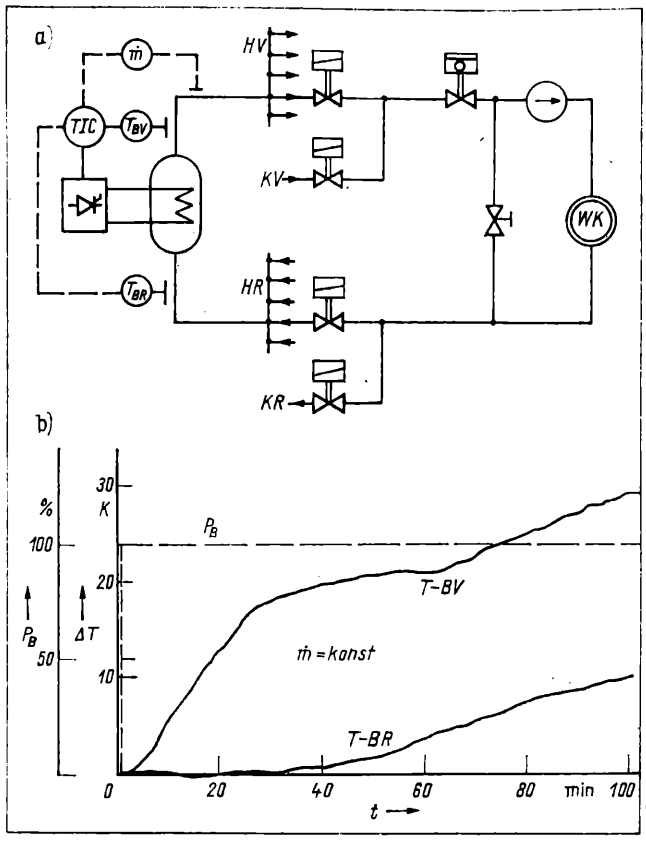



**Bild 3. Beispiel Warmwasserboiler**

a) technologisches Schema: HV Heizwasserverteiler, HR Heizwassersammler, KV Kaltwasserverteiler, KR Kaltwassersammler, WK Wandkreislauf; b) gemessene Sprungantwort

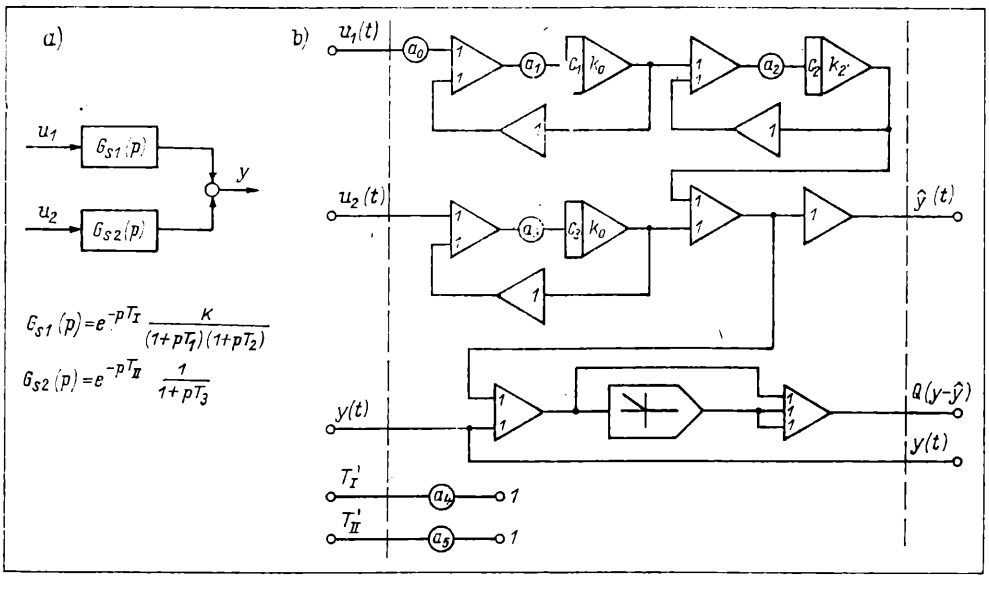



**Bild 4. Modellstruktur und Analogrechenschaltung des Warmwasserboilers**

a) Modellstruktur; b) Analogrechenschaltung (Bemerkung: Die Laufzeiten werden intern im Mikrorechner erzeugt, deren Größe wird durch die Koeffizientenpotentiometer $a_4$ und $a_5$ vorgegeben)

Rücklauftemperatur $u_2$ ist aus technologischen Gründen nicht konstant zu halten und wird mitregistriert (Bild 3b). Die theoretische Analyse liefert den im Bild 4a dargestellten Strukturansatz. Dieser wird mit Hilfe einer Strukturnachbildung auf dem Analogrechner programmiert (Bild 4b). Die Eingangssignale $u_1$ und $u_2$ werden durch den Mikrorechner bereitgestellt. Nach einigen Einstellversuchen (Parameter $a_0, \ldots, a_5$) gelingt es recht gut, das vorhandene Modell bezüglich der gemessenen Sprungantwort abzugleichen[3]).

Eine wirksame Hilfe beim Abgleich stellt die Bereitstellung des Fehlersignals (Integral der Fehlerbeträge) dar, das auf einem dritten Kanal des Mehrkanalsichtgerätes ausgegeben wird.

Die Systemparameter ergeben sich, wenn Amplitudennormierung und Zeittransformation wieder rückgängig gemacht werden, zu

$$K = a_0 \cdot y^*/u_1^*,$$
$$T_n = m_t/(k_0 \cdot c_n \cdot a_n), \quad n = 1, 2, 3,$$
$$T_I = \mathrm{INT}(k \cdot a_4) \cdot T_a,$$
$$T_{II} = \mathrm{INT}(k \cdot a_5) \cdot T_a.$$

$y^*$, $u_1^*$ Bezugsgrößen bei der Amplitudennormierung; $m_t$ Faktor für Zeittransformation; $T_a$ Tastzeit; $k$ Normierungsfaktor

In der Tafel sind die Parametersätze für vier Einstellversuche wiedergegeben. Eine bessere Übereinstimmung bei der Konstellation kann kaum erwartet werden da immerhin sechs Parameter zu bestimmen waren.

Diese Parameter bildeten die Grundlage einer nachfolgenden Dimensionierung für die Regelung der Vorlauftemperatur. Dabei wurde an $G_{S1}(p)$ ein PI-Regler bemessen, während $G_{S2}(p)$ die Basis für eine Störgrößenaufschaltung der Rücklauftemperatur bildete [3]. In diesem Beispiel erwies sich die erreichte Modellgüte als völlig ausreichend, was im praktischen Betrieb mit geschlossenem Regelkreis nachgewiesen wurde.

[2]) Die Zeitangaben beziehen sich auf ein U880-Mikrorechnersystem mit einem Takt von 2,5 MHz.

[3]) In der Regel benötigte ein Operateur für einen Abgleich etwa 5 min.

Tafel. Ermittelte Modellparameter

| Parameter | Einstellung | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $K$ in K/kW | 1,65 | 1,43 | 1,72 | 1,76 |
| $T_{\mathrm{I}}$ in min | 1,3 | 1,3 | 0,7 | 0,7 |
| $T_1$ in min | 12,2 | 13,2 | 12,8 | 13,0 |
| $T_2$ in min | 0,7 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| $T_{\mathrm{II}}$ in min | 6,7 | 6,7 | 6,7 | 6,7 |
| $T_3$ in min | 14,4 | 15,3 | 20,6 | 20,6 |

Werden höhere Anforderungen an die Genauigkeit gestellt, bestehen auch hier Möglichkeiten für weitere, im Abschn. 1. genannte Untersuchungen, so z. B. die Experimentation mit anderen (u. a. periodischen) Testsignalen.

### Zusammenfassung

Im Beitrag wurde ein praktikables Verfahren zur experimentell gestützten Parameterschätzung vorgestellt, das auf einem Handabgleich der Parameter eines Parallelmodells beruht. Diese Lösung verbindet die Vorteile der Analog- und Digitalrechentechnik

- hohe Rechengeschwindigkeit (Parallelarbeit)
- günstige Signalspeicherung
- flexible, einfach programmierbare Steuerung des Experiments und der Identifikation,

integriert auf der Basis einer angepaßten Mensch-Maschine-Kommunikation den Experimentator in den Parameterschätzalgorithmus, benötigt dadurch nur eine verhältnismäßig einfache Gerätetechnik und setzt beim Experimentator keine Spezialkenntnisse auf dem Gebiet der Identifikation voraus.
Damit bietet sich diese Methode für viele Einsatzfälle an, bei denen mit geringem materiellen und Vorbereitungsaufwand Experimente auszuwerten sind, bei denen die Anzahl der zu bestimmenden Parameter relativ klein (etwa 4 bis 7) ist, elementare Auswerteverfahren aber versagen.

### Literatur

[1] *Reinisch, K.*: Analyse und Synthese kontinuierlicher Steuerungssysteme. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.
[2] *Strobel, H.*: Experimentelle Systemanalyse. Berlin: Akademie-Verlag 1975.
[3] *Badelt, W.; Hauser, S.; Pillat, P.*: Konzipierung und Einsatzvorbereitung der Automatisierungseinrichtung für ein Mikroklimalabor. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 35 (1986) 1, S. 114–118.
msr 8710

*O. Groll*

# Rechnergestützte Optimierung der Arbeitsweise einer Brotteigteil- und Wirkmaschine unter automatisierungstechnischen Aspekten

## 0. Einleitung

Viele Technologien der Lebensmittelindustrie erfordern ein möglichst genaues Portionieren pastöser Medien, sobald ein Endprodukt als Stückgut vorliegen muß. Aus anlagen- und verfahrenstechnischen Gründen erfolgt diese Masseportionierung häufig mittelbar durch eine Volumenportionierung. Typisch für die indirekte Masseportionierung pastöser Medien ist die bei der Brotherstellung verwendete Brotteigteil- und Wirkmaschine (BTW), deren Funktionsschema Bild 1 zeigt.
Bei der Erarbeitung eines Automatisierungskonzeptes für die BTW zur Massestabilisierung wurde deutlich, daß bei der Konzipierung traditioneller technologischer Verfahren steuerungstechnische Aspekte nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden. Für den Regelungstechniker stellt sich bei der Automatisierung solcher Verfahren als zusätzliche Aufgabe, verfahrenstechnische Änderungen mit dem Ziel durchzusetzen, den Aufwand für die Automatisierungsanlage zu verringern. Der Regelungstechniker muß prinzipiell erkennen, ob technologische Verfahren automatisierbar sind, bzw. Änderungsvorschläge einbringen, die zur Automatisierbarkeit eines Verfahrens führen.

## 1. Funktionsweise der BTW

Über eine Förderschnecke wird Teig aus dem Vorratsbehälter ausgetragen. Der ausgetragene Teigstrang senkt sich auf eine an einem Wägebalken befestigte Rolle. Mit zunehmender Länge und Masse des Teigstranges bewegt sich der Wägebalken. Bei einer bestimmten Stellung startet das rotierende Messer. Dieses Messer trennt den Teigstrang von der Auspreßdüse. Das abgetrennte Teigstück wird über eine Rolle abgeleitet und fällt auf das Transportband. Die Stellgröße zur Steuerung der Masse der Wirklinge ist der Startzeitpunkt des Messers, der durch den Abstand zwischen Auspreßdüse und Wägebalken bestimmt wird.
Am Ausgang des Transport- und Wirkbandes wird die Stückmasse durch eine Waage erfaßt.

## 2. Störgrößen

Neben einer Vielzahl von Störgrößen, wie Qualitätsschwankungen der Eingangsprodukte, Dosierfehler, Viskositätsschwankungen, Spannungsschwankungen usw., treten zwei Hauptstörgrößen auf:

- Die unterschiedliche Füllhöhe des Vorratsbehälters bewirkt eine Änderung der Auspreßgeschwindigkeit an der Auspreßdüse und somit unterschiedlich portionierte Volumina. Als Auswirkung dieser Störung ergibt sich ein sägezahnförmiger Verlauf der Masseabweichung mit einem Scheitelwert $\Delta m_{\mathrm{WS}} = 40$ g. Der Anstieg der Flanken ist von der Füll- und Austragegeschwindigkeit in bzw. aus dem Vorratsbehälter abhängig. Im Bild 2 wurde der steuerungstechnisch ungünstigere Fall (mit maximaler Füll- und Austragegeschwindigkeit) dargestellt. Alle weiteren vorangehend genannten Störungen haben ähnliche Auswirkungen auf die Masse. Da ihre Amplitude und Frequenz wesentlich kleiner sind als bei der vorangehend beschriebenen Störung, wurden diese nicht untersucht.
- Das bei der Teigherstellung in Abhängigkeit vom Gärverlauf im Teig eingeschlossene $CO_2$ bewirkt Dichteschwankungen, deren Auswirkungen auf die Masse der Wirklinge nur statistisch erfaßt werden können. Sie sind normalverteilt. Als Standardabweichung wurde $\sigma = 10{,}5$ g ermittelt. Der Mittelwert $\overline{m}_{\mathrm{w}}$ ist mit dem Massesollwert $w_{\mathrm{m}} = 1140$ g identisch (Bild 3).

## 3. Zielstellung

Bei der industriellen Brotherstellung wird die Ökonomie des Gesamtprozesses wesentlich durch die Portioniergenauigkeit der Wirklinge (Teigstücke) bestimmt.
Ziele der durchgeführten Arbeiten waren:

- quantitative Erfassung der Hauptstörgrößen und deren Auswirkungen auf die Masse der Wirklinge

Dr.-Ing. *Olaf Groll* (50) studierte nach einer Funkmechanikerlehre von 1959 bis 1962 an der Ingenieurschule für Feinwerktechnik in Jena BMSR-Gerätebau. Von 1963 bis 1977 als Projekt-, Offert- und Entwicklungsingenieur im VEB GRW Teltow. Von 1971 bis 1976 Fernstudium an der TH Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik. 1982 Promotion A an der TH Leipzig. Von 1981 bis 1983 Gruppenleiter im Institut für Getreideverarbeitung Potsdam Rehbrücke. Von 1983 bis 1985 wissenschaftlicher Oberassistent an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg im Bereich Automatisierung. Seit 1985 wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Nahrungsgüterwirtschaft und Lebensmitteltechnologie an der Humboldt-Universität zu Berlin.

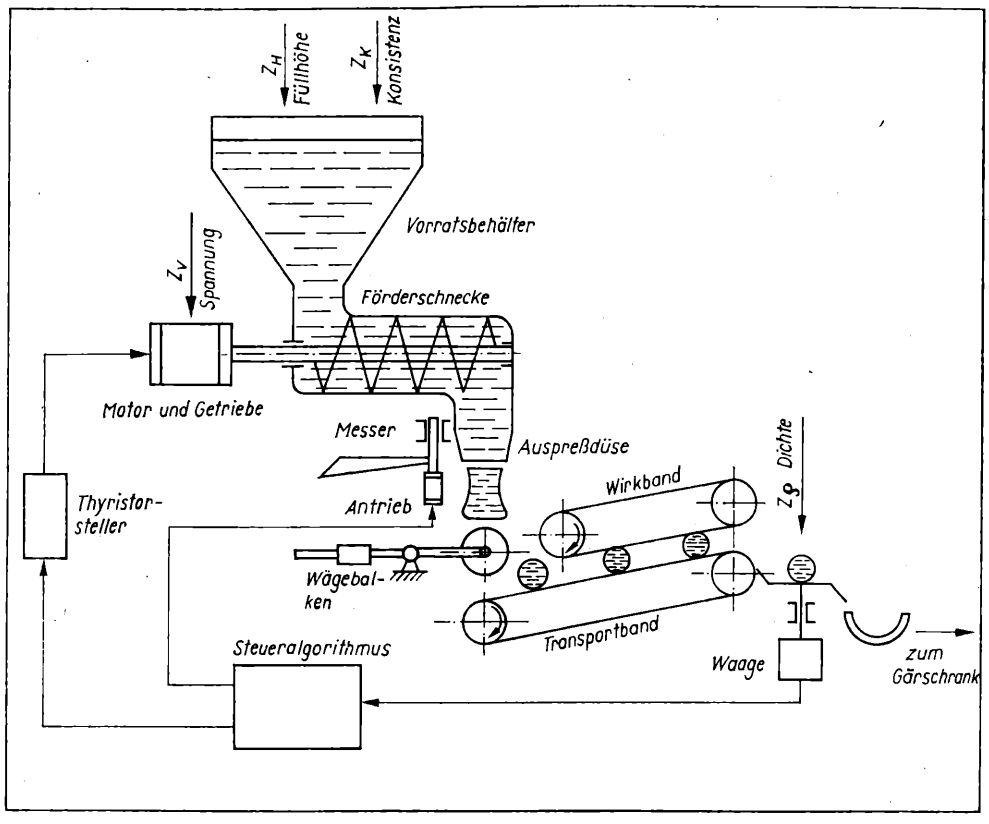



**Bild 1. Funktionsschema der Brotteigteil- und Wirkmaschine**

**Bild 2. Verhalten der BTW bei sägezahnförmiger Änderung der Füllhöhe (ohne Regler)**
Störgröße: Füllhöhe $\Delta h = 40$ cm, Füllgeschwindigkeit $v_F = 0{,}666$ cm/s, Austragegeschwindigkeit $v_L = 9{,}52 \cdot 10^{-3}$ cm/s
Regelgröße: Masse $m_w(t)$ in g, Auspreßgeschwindigkeit $v_A(t)$ in cm/s ▼

- Analyse der Steuerbarkeit der BTW und gegebenenfalls Vorschläge zu konstruktiven Änderungen im Sinne der Automatisierbarkeit
- Automatisierungskonzept mit quantitativen Aussagen zur Steuerbarkeit der Masse der Wirklinge.

Wie aus Beschreibung der BTW zu erkennen ist, liegt ein Stückgutprozeß vor. Die Regelgröße Masse $m_w$ ist demgemäß ein diskontinuierliches analoges Signal. Charakteristisch für die vorliegende Regelstrecke sind große Totzeiten.
Diskontinuitäten und große Totzeiten verbieten die Anwendung von konventionellen, ingenieurtechnisch aufbereiteten Entwurfsmethoden. Es mußten aufwendigere rechnergestützte Entwurfsverfahren angewendet werden.

## 4. Systemidentifikation und Modellierung

Das Modell der BTW (Bild 4) wurde mit den Methoden der experimentellen Prozeßanalyse an einer Anlage unter Produktionsbedingungen ermittelt. Als Testsignale dienten sprung- und rampenförmige Eingangsgrößen.
Antriebsmotor, Getriebe und Förderschnecke sind durch lineare Differentialgleichungen, bzw. durch die aus diesen abgeleiteten Übertragungsfunktionen beschrieben worden. Eine solche Näherung ist vertretbar, da vereinfachend angenommen werden darf, daß sich die Prozesse in der Umgebung der Arbeitspunkte linear verhalten. Die Beschreibung der Dynamik durch Differentialgleichungen niederer Ordnung stellt ebenfalls eine Näherung dar. Auch diese Näherung ist zulässig, da die Dynamik des Gesamtsystems vorrangig durch technologisch bedingte Totzeiten und die Taktzeit des Schlagmessers $T_A$ bestimmt wird. Dieser Sachverhalt wurde am Modell empirisch nachgewiesen.

## 5. Untersuchungen am Modell

Das als Blockschaltbild vorliegende Modell (Bild 4) wurde auf einem Digitalrechner simuliert.

### *5.1. Wahl des Reglertyps*

Da außer für die Erfassung der Regelgröße Masse $m_w$ keine industriell nutzbaren Verfahren zur Messung der auftretenden Stör- und Zustandsgrößen zur Verfügung stehen, kann nur ein einschleifiger Regelkreis mit PI-Regler aufgebaut werden. Eine

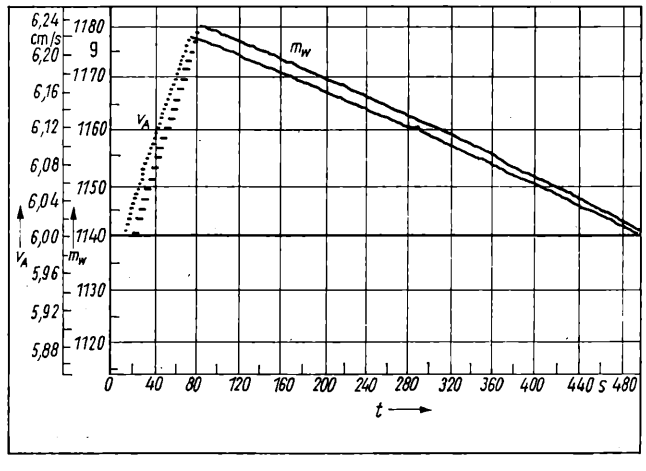
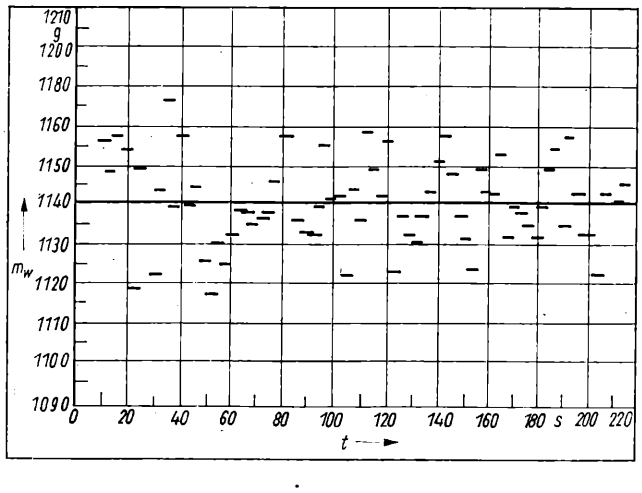



**Bild 3. Zeitverhalten der Masse $m_w$ bei stochastischer Störung der Dichte**
Störgröße: normalverteilte Störung der Dichte $\varrho$ in g/cm³
Regelgröße: Masse $m_w$ in g



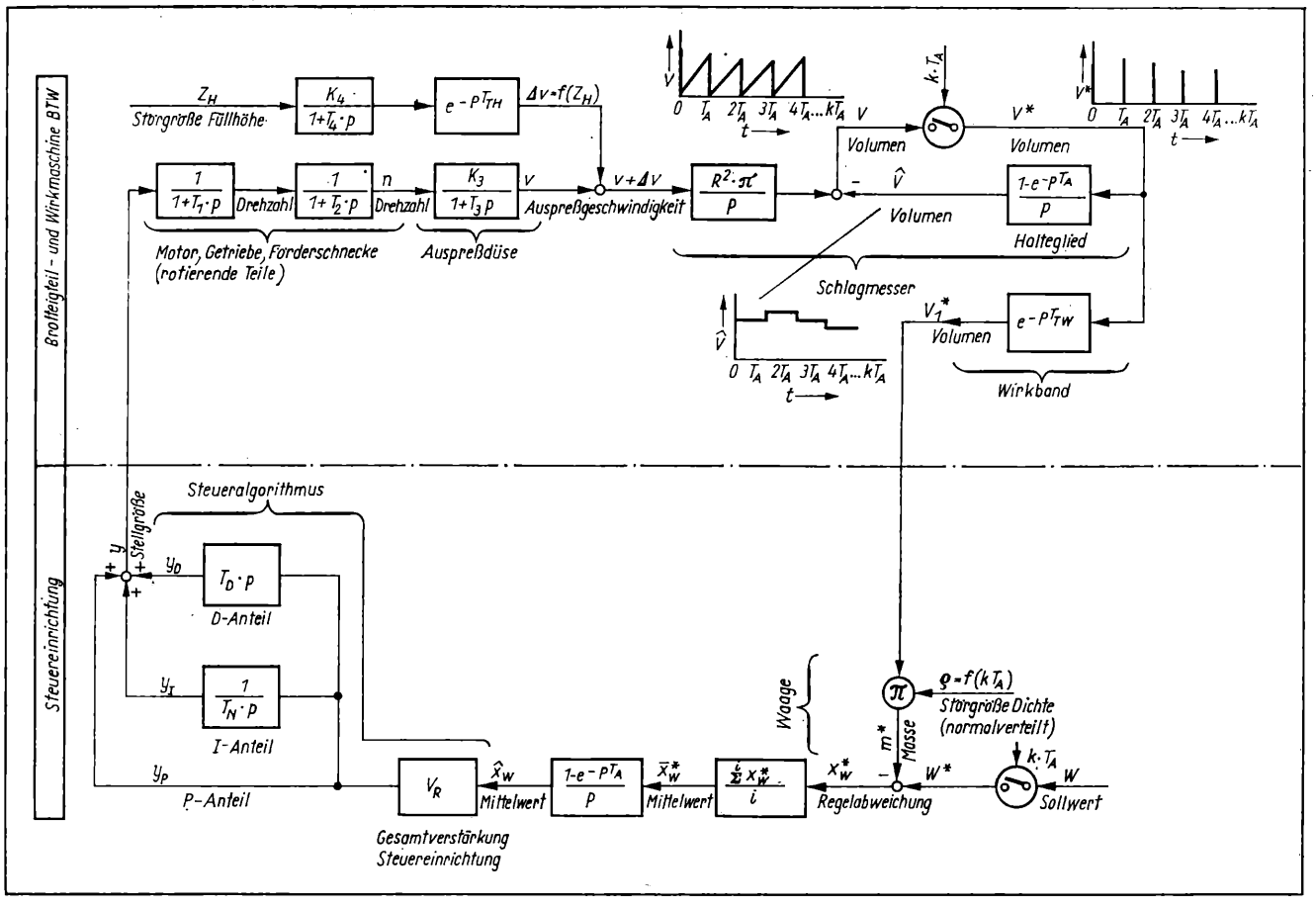



**Bild 4. Modell BTW mit automatischer Steuerung**

**Maßeinheiten:** $[Z_H] = [K_3] =$ cm; $[v] = [\Delta v] =$ cm/s; $[V] = [V^*] = [\hat{V}] = [V_1^*] =$ cm³; $[n] = [K_4] =$ 1/s; $[W] = [W^*] = [m^*] = [x_w^*] = [\hat{x}_w] = [\bar{x}_w^*] =$ g; $[V_R] =$ 1/gs

Strukturoptimierung im eigentlichen Sinn entfällt. Den Einsatz eines Reglers mit D-Anteil verbietet der durch die stochastische Störgröße $\varrho = f(k \cdot T_A)$ bedingte treppenförmige Verlauf der Regelabweichung $\hat{x}_w(t)$ (siehe Bild 3). Durch Differentiation von $x_w(t)$ würden als Teilstellgröße $y_D$ am Ausgang des D-Gliedes (siehe Bild 4) im Abstand der Taktzeit $T_A$ unerwünschte positive bzw. negative Impulse entstehen, die der Stellgröße $y = y_P + y_I + y_D$ überlagert sind.

### *5.2. Parameteroptimierung des Reglers*

Als optimal eingestellt sollen die Parameter des PI-Algorithmus dann gelten, wenn nach einer sprungförmigen Störung der Füllhöhe $z_H(t) = \Delta h \cdot 1(t)$ der Masseverlust aus der Sicht des Backwarenbetriebes und des Verbrauchers minimal ist. Aus dieser Forderung folgt als Gütekriterium $G$:

$$G(V_R, T_N) = \Sigma|\Delta x_w(k \cdot T_A)| \rightarrow \min .$$

Bei Erfüllung des Gütekriteriums verläuft die Regelabweichung $\Delta x_w(n \cdot T_A)$ (Bild 5) so, daß die Summe der Absolutbeträge aller Masseabweichungen einem Minimum zustrebt. Für alle zu untersuchenden konstruktiven Varianten der BTW wurde mit Hilfe eines Suchalgorithmus, ausgehend von der definierten Zielfunktion, die optimale Parametereinstellung des PI-Algorithmus ermittelt.

### *5.3. Optimierung des Verfahrens durch konstruktive Änderungen*

Bedingt durch den Investitionsablauf wird in vielen Fällen dem MSR-Projektanten ein verfahrens- und apparatetechnisch abgeschlossenes Projekt vorgelegt. Aus der Sicht des MSR-Anlagenbaues notwendig werdende Änderungen sind in dieser Phase kaum oder nur mit großem Aufwand möglich, so auch im ausgewählten Beispiel.

Es zeigt sich, daß durch ökonomisch vertretbare konstruktive Änderungen der BTW deren Steuerbarkeit erst möglich wird bzw. erheblich verbessert werden kann.

Zur Beurteilung durchzuführender konstruktiver Änderungen gelten als Vergleichswerte:

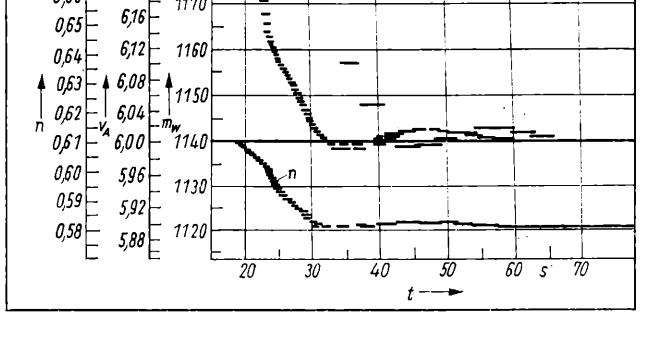
- bei rampenförmiger Störgröße (siehe Bild 2 und Abschnitt 2.): der relative Gütewert $G_r$ für eine Periode der Störung und die relative maximale Regelabweichung $\Delta m_{wr}$, jeweils bezogen auf den ungesteuerten Fall
- bei normalverteilter Störung (siehe Bild 3 und Abschnitt 2.): der relative Mittelwert der Regelabweichung $\Delta m_{wr}$ bezogen auf den Sollwert und die relative Streuung $\sigma_r$, bezogen auf den ungesteuerten Fall.

#### 5.3.1. Wahl der Stellgrößen

Die im Handbetrieb der BTW verwendete und ursprünglich vorgesehene Stellgröße „Abstand Auspreßdüse/Wägebalken" ist aus folgenden Gründen für eine automatische Steuerung ungeeignet: Der zeitliche Verlauf der durch die stochastische Störgröße $\varrho = f(kT_A)$ hervorgerufenen Regelabweichung $\Delta m_w$ ist im Bild 3 zu erkennen. Im Bild 6 ist der zugehörige zeitliche Verlauf des

**Bild 5. Einschwingverhalten der BTW nach sprungförmiger Änderung der Füllhöhe (PI-Regler)**

**Störgröße:** Füllhöhe $\Delta h = 40$ cm; **Regelgröße:** Masse $m_w(t)$; **Zustandsgröße:** Anpreßgeschwindigkeit $v_A(t)$; **Stellgröße:** Drehzahl $n(t)$



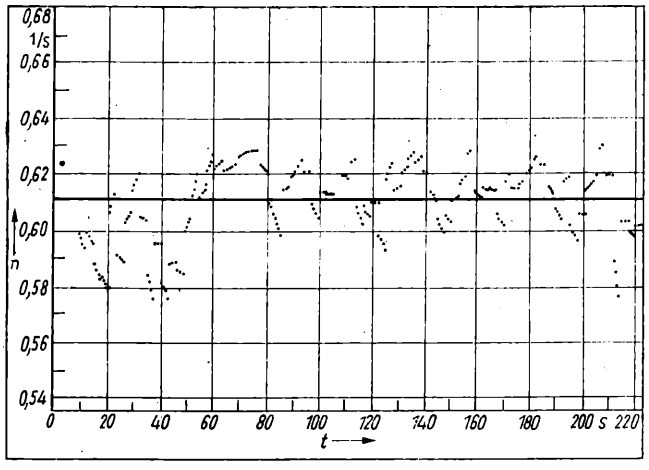



**Bild 6. Zeitverhalten der Stellgröße $n$ bei stochastischer Störung der Dichte (PI-Regler)**

Störgröße: normalverteilte Störung der Dichte $\varrho = f(kT_A)$; Regelgröße: Masse $m_w(t)$; Stellgröße: Drehzahl $n(t)$

Stellsignals eines PI-Reglers dargestellt. Es ist ersichtlich, daß die notwendige Schalthäufigkeit eines geeigneten pneumatischen oder elektromechanischen Stellgliedes $f_s = 21 \frac{1}{\text{min}}$ betragen müßte. Aus Gründen der Realisierbarkeit, d. h., hinsichtlich der Relation Schalthäufigkeit/Lebensdauer, ist die Stellgröße „Abstand Auspreßdüse/Wägebalken" zur automatischen Steuerung der Masse $m_w$ (Regelgröße) an der BTW, nicht geeignet [6].
Eine Beruhigung durch ein Hystereseglied entfällt aus Genauigkeitsgründen, da der Schwellwert auf etwa $2\sigma = \pm 21$ g eingestellt werden müßte.
Als Stellgröße bietet sich bei konstanter Taktzeit des Schlagmessers $T_A$ die Drehzahl $n$ der Förderschnecke an [5].
Durch $T_A$ = konst. ergibt sich als zusätzlicher gewünschter Effekt eine konstante optimale Beschickung des nachfolgenden Ofens. Bild 6 zeigt den Verlauf des Stellsignals ohne Dämpfung durch die rotierenden Massen des Motors, des Getriebes und der Förderschnecke.

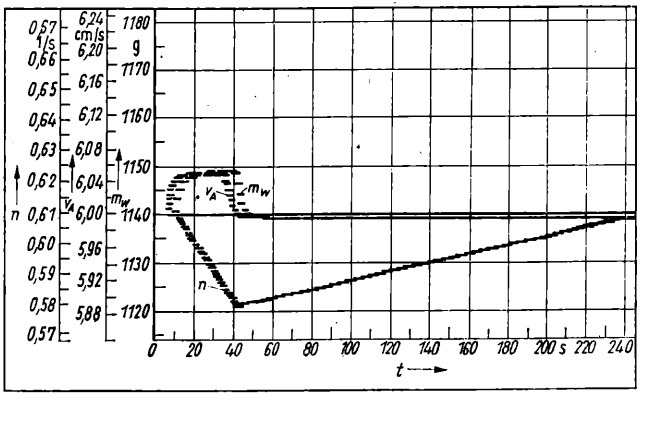
5.3.2. Untersuchungen zur Anordnung und Einschwingzeit der Wägeeinrichtung

*Variante 1*

Um den konstruktiven Aufwand bei der Anordnung der Wägeeinrichtung einschließlich Beschickungseinrichtung möglichst gering zu halten, sollte ursprünglich die Waage hinter dem Transport- und Wirkband (siehe Bild 1) angebracht und nur die Masse $m_w$ jedes achten Wirklings erfaßt werden. Bereits bei der Parameteroptimierung war das Einschwingverhalten dieser Lösung so schlecht, daß eine weitere Untersuchung mit den realen Störgrößen aus Aufwandsgründen entfallen konnte. Diese konstruktive Lösung ist aus automatisierungstechnischer Sicht abzulehnen.

**Bild 7. Verhalten der BWT bei sägezahnförmiger Änderung der Füllhöhe (PI-Regler)**

Störgröße: Füllhöhe $\Delta h = 40$ cm, Füllgeschwindigkeit $v_F = 0{,}066$ cm/s, Austraggeschwindigkeit $v_L = 9{,}52 \cdot 10^{-3}$ cm/s; Regelgröße: Masse $m_w(t)$; Zustandsgröße: Auspreßgeschwindigkeit $v_A(t)$; Stellgröße; Drehzahl $n(t)$




**Tafel. Beurteilung der Steuerbarkeit der BTW bei unterschiedlichen konstruktiven Lösungen**

| | rampenförmige Störung | | stochastische Störung | |
|---|---|---|---|---|
| | relativer Gütewert $G_r$ | relative maximale Regelabweichung $\Delta m_{wr}$ | relative Streuung $\sigma_r$ | relativer Mittelwert der Regelabweichung $\Delta m_{wr}$ |
| Variante 2 | $16{,}29 \cdot 10^{-3}$ | $33{,}71 \cdot 10^{-3}$ | 1 | 1 |
| Variante 3 | $10{,}00 \cdot 10^{-3}$ | $21{,}30 \cdot 10^{-3}$ | 1 | 1 |
| Variante 4 | $2{,}42 \cdot 10^{-3}$ | $6{,}47 \cdot 10^{-3}$ | 1 | 1 |

*Variante 2*

Ebenfalls aus konstruktiven Gründen ist die Waage hinter dem Transportband angeordnet. Durch die Waage wird der Mittelwert der Masse aus acht Wirklingen erfaßt. Auch diese Lösung bietet aus automatisierungstechnischer Sicht keine befriedigende Lösung (siehe Tafel).

*Variante 3*

Die Wägeeinrichtung ist hinter dem Transport- und Wirkband angeordnet. Es wird jeder Wirkling gewogen. Bild 7 zeigt den Verlauf der Regelgröße $m_w$, der Auspreßgeschwindigkeit $v_A$ aus der Düse und die Stellgröße $n$ bei anliegender rampenförmiger Störgröße „Füllhöhe". Diese konstruktive Lösung ist akzeptabel (siehe Tafel).

*Variante 4*

Die Anordnung der Wägeeinrichtung erfolgt vor dem Transportband. Es wird jeder Wirkling gewogen.
Da die Transporttotzeit entfällt, ist die Lösung unter dem Aspekt der Steuerbarkeit optimal.
Als vorrangige Forderung an das Wägesystem ergibt sich aus dem Variantenvergleich, daß die Einschwingzeit, zuzüglich der Zeit zur automatischen Nullpunktkorrektur (bei jeder Messung), und die Beschickungszeit kleiner als die Abtastzeit $T_A = 2{,}5$ s sein müssen. Die Wägeeinrichtung sollte den letzten Meßwert über eine Taktzeit $T_A$ halten und gegebenenfalls weitere Funktionen wie Soll-/Istwertvergleich, Grenzwertsignalisation, Vorwärts-/Rückwärtszählung usw. übernehmen.

## Zusammenfassung

Die Portioniergenauigkeit eines Masseportionierers, der nach dem Prinzip der Volumenportionierung arbeitet, läßt sich durch einen einschleifigen Regelkreis verbessern.
Am ausgewählten Beispiel, der Brotteigteil- und Wirkmaschine konnte im Modellversuch nachgewiesen werden:

- Aus Gründen der Realisierbarkeit ist die Stellgröße „Abstand Auspreßdüse/Wägebalken" ungeeignet.
- Als Stellgröße ist nur die Drehzahl der Förderschnecke zweckmäßig.
- Durch konstruktive Maßnahmen läßt sich die Steuerbarkeit der Anlage wesentlich verbessern.
- Auswirkungen von Störgrößen auf die Masse $m_w$ mit einer Periodendauer von $T > 4$ min werden befriedigend abgebaut.
- Nicht gedämpft werden stochastisch überlagerte Störungen. Fordert man, daß mindestens 95,4% der portionierten Stücke innerhalb der Massetoleranz liegen, ist der Sollwert der zu portionierenden Masse um $2\sigma$ höher einzustellen. Vom Hersteller muß dann ein mittlerer Masseverlust von $2\sigma$ pro Stück in Kauf genommen werden. Dieser Verlust kennzeichnet die theoretische Genauigkeitsgrenze des Wirkprinzips der BTW.

## Literatur

[1] *Isermann, R.*: Digitale Regelsysteme. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1977.
[2] *Smith, O. J. M.*: A controller to overcoms dead time. ISA-Journal 6 (Februar 1959), S. 28–33.
[3] *Schmidt, G.*: Vergleich verschiedener Totzeitregelsysteme. msr, Berlin 10 (1967) 2, S. 71–75.
[4] *Schneeweiß, R.; Klose, D.*: Technologie der industriellen Backwarenproduktion. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1981.
[5] *Dörfer, G.; Groll, O.; Pauli, F.*: Wirtschaftspatent 205060.
[6] Katalog Automation Bauteile. PE VENTIL 06 S. 11. VEB GRW Teltow, Dezember 1978.

msr 8723

*G.-H. Geitner; H. Krug*

# Zur Anwendung des Betragsoptimums für digital geregelte Gleichstromantriebe

## 0. Einleitung

Ein wesentliches Problem bei DDC-Gleichstromantrieben ist die Auswahl eines geeigneten Regelstreckenmodells, daß das Übertragungsverhalten der Strecke hinreichend genau beschreibt und eine bequeme Parameterbestimmung ermöglicht. Für viele praktische Anwendungen ist die Optimierung nach dem in [1] begründeten Betragsoptimum für digitale Regler (BOD) geeignet. Im Beitrag wird eine geschlossene Form dieser Optimierungsvorschrift angegeben und ihre Anwendung an Beispielen demonstriert.

Die mit den Motoren MBC 180 M2 (22 kW, 440 V) und MGC 90 L1 (0,4 kW, 220 V) durchgeführten praktischen und theoretischen Untersuchungen ermöglichen eine Wertung verschiedener Regelstreckenmodelle für DDC-Gleichstromantriebe sowie einen Vergleich bekannter und vorgeschlagener näherungsweiser Reglereinstellungen, die für den Ingenieur in der Praxis von Bedeutung sind.

Berücksichtigt werden bei dem Vergleich auch die mit dem Betragsoptimum für analoge Regler (BOA) näherungsweise ermittelten Reglerparameter.

## 1. Geschlossene Darstellung des BOD zur Führungsoptimierung

Liegt die $z$-Übertragungsfunktion der Regelstrecke in der Form

$$G_S(z^{-1}) = \frac{n_0}{m_0} \cdot \frac{(1 + n_1 z^{-1} + \ldots + n_N z^{-N})}{(1 + m_1 z^{-1} + \ldots + m_M z^{-M})} z^{-k_t} =$$

$$= \frac{n_0}{m_0} \cdot \frac{(1 + n_1 z^{-1} + \ldots + n_N z^{-N})\, z^{-k_t}}{(1 + \overline{m}_1 z^{-1} + \ldots + \overline{m}_{M-1} z^{-(M-1)})\,(1 + \overline{m}_M z^{-M})} \qquad (1)$$

vor und wird der zu optimierende digitale Regler entsprechend [2] durch

$$G_R(z^{-1}) = \frac{V_R(1 + d_1 z^{-1} + \ldots + d_p z^{-p})}{(1 - z^{-1})\,(1 + b_1 z^{-1} + \ldots + b_q z^{-q})} \qquad (2)$$

beschrieben, dann gilt bei Betragsoptimierung nach [1] allgemein $b_1 = b_2 = \ldots = b_q = 0$.

Als Koeffizienten des Zählerpolynoms ergeben sich bei

– *Kompensation aller Zeitkonstanten*

$$d_j = m_j \quad \text{mit} \quad 0 \leqq j \leqq M\ (M \leqq 3) \quad \text{und} \quad x = 0 \qquad (3a)$$

– *nicht kompensierter kleinster Zeitkonstante* $T_M$

$$d_j = \overline{m}_j \quad \text{mit} \quad 0 \leqq j < M (M \leqq 4)$$

und

$$x = \overline{m}_M = -e^{-T/T_M}\,. \qquad (3b)$$

Die in Klammern angegebenen Werte stellen technisch sinnvolle Grenzen, aber keine Grenzen des Optimierungsverfahrens dar. Die Reglerverstärkung $V_R$ mit dem nach (3a) und (3b) gewonnenen $x$, den Koeffizienten $n_j$ und der Totzeit $k_t$ des Zählerpolynoms der Regelstrecke lautet dann:

$$\left.\begin{aligned} V_R &= \frac{m_0}{n_0} \cdot \frac{(1 + x)^2}{\sum_{\nu=0}^{N} K_\nu \cdot n_\nu}\,, \\ K_\nu &= \{[2(\nu + k_t) - 1] + [2(\nu + k_t) - 3] \cdot x\}\,. \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Das nachfolgende Beispiel soll die Anwendung von (4) verdeutlichen.

*Gegeben*:

Regelstrecke mit 2 Verzögerungsgliedern 1. Ordnung und einer Totzeit gleich der Abtastzeit ($k_t = 1$)

$$G_S(z^{-1}) = \frac{n_0}{m_0} \cdot \frac{(1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2})}{(1 + \overline{m}_1 z^{-1})\,(1 + \overline{m}_2 z^{-1})}\, z^{-k_t}$$

*Gesucht*:

$$G_R(z^{-1}) = V_R \frac{(1 + d_1 z^{-1})}{(1 - z^{-1})}\,.$$

Aus der Aufgabenstellung folgt neben der nichtkompensierten kleinsten Zeitkonstante, die entsprechend der $z$-Übertragungsfunktion in $\overline{m}_2$ enthalten ist, $d_1 = \overline{m}_1$ und $x = \overline{m}_2$ nach (3b). Mit den 3 Werten $K_\nu$:

$$K_0 = 1 - \overline{m}_2\,, \qquad K_1 = 3 + \overline{m}_2\,, \qquad K_2 = 5 + 3\overline{m}_2$$

ergibt sich gemäß (4) die Reglerverstärkung für die betragsoptimale Einstellung zu

$$V_R = \frac{m_0}{n_0} \cdot \frac{(1 + \overline{m}_2)^2}{K_0 + K_1 n_1 + K_2 n_2}\,.$$

(3) und (4) sind einfache und übersichtliche allgemeine Beziehungen für den praktisch wichtigen Fall, daß die Regelstrecke aus Verzögerungsgliedern und Totzeiten besteht. Sie sind die Grundlage für die Programmierung in einer höheren Programmiersprache.

## 2. Modellbildung und Regleroptimierung für den unterlagerten Regelkreis mit Stromrichterstellglied

Im unterlagerten Regelkreis ist die Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens des Stromrichterstellgliedes besonders wichtig, wenn es auf höchste Dynamik ankommt. Der Regler ist i. allg. mit dem Stellglied synchronisiert, da er unmittelbar die Ansteuersignale für die Leistungshalbleiter liefern soll. Im Bild 1 sind Strukturen für den Stromregelkreis des DDC-Antriebs angegeben. Sie gelten unter folgenden Voraussetzungen:

– Optimierung im nichtlückenden Bereich
– Einsatz von 6-Puls-Stromrichtern (B6C, $T = 3{,}\overline{3}$ ms)
– Messung des Strommittelwertes netz- oder zündsynchron [6].

Die Strukturen unterscheiden sich im gewählten Stromrichtermodell. Keines der Modelle beschreibt das Verhalten exakt, alle Modelle halten aber den Berechnungsaufwand in Grenzen. Die Summenzeitkonstante $T_\Sigma$ und die Totzeit $T_t$ sind zunächst variabel. Tafel 1 enthält die $z$-Übertragungsfunktionen der einzelnen Regelstrecken und die entsprechende Dimensionierung der Verstärkung eines digitalen PI-Reglers mit $d_1 = -e^{-T/T_s}$ nach (3) und (4).

Ziel der weiteren Ausführungen ist die Auswahl eines möglichst einfachen Vorzugsmodells für den Stromrichter. Dieses Modell soll die Berechnung der optimalen Verstärkung $\overline{V}_R$ aus den „Mittelwerten" der Größen $m$ und $T_\Sigma$ (nicht konstant!) mit hinreichender Genauigkeit und in guter Übereinstimmung mit Messungen ermöglichen.

Bei Einsatz einer durchgehenden digitalen Regelung (DDC), z. B. auf Grundlage von [3], kann die Rechnerlösung selbst zur Bestimmung der mittleren Streckenverstärkung $V_S$ und der Zeitkonstante $T_S$ verwendet werden. Durch ein entsprechendes Testprogramm für den gesteuerten Betrieb des Stromrichters erfolgt die Vorgabe von Zündwinkelsprüngen. Der Stromverlauf wird bei $U_{Feld} = 0$ oszillografiert oder abgespeichert. Die Verstärkung ist damit in rechnerangepaßter Form und in einem Arbeitsgang ermittelt.

Gemessen wurden $T_S = 52$ ms und $V_S = 0{,}9$. Bei Festlegung von $d_1 = -15 \cdot 2^{-4} = -0{,}9375$ ($e^{-T/T_s} = 0{,}9379$) und sinnvoller Variation $0 < T_t < T$, $1\text{ ms} \leqq T_\Sigma \leqq 4$ ms wurde ein Parameterbereich berechnet und experimentell $\overline{V}_{Ropt} = 6$ gefunden. Dieser Wert ist theoretisch etwa mit folgenden Vorga-

---

Dr.-Ing. *Gert-Helge Geitner* (33) studierte von 1972 bis 1976 an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden. Danach wissenschaftlicher Assistent am Bereich Elektrische Automatisierungstechnik dieser Sektion. 1981 Promotion A. 1982 bis 1983 Zusatzstudium am Leningrader Polytechnischen Institut.

Dr. sc. techn. *Hans Krug* (48) studierte von 1957 bis 1963 an der TH bzw. TU Dresden Elektrotechnik (Starkstromtechnik). 1963 bis 1966 wissenschaftlicher Assistent am Institut für elektrische Maschinen und Antriebe der TU Dresden. Ab 1966 wissenschaftlicher Oberassistent an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden. 1968 Promotion A, 1974 Promotion B. 1979 bis 1982 Gasttätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna/UdSSR. Seit 1985 am Zentralinstitut für Kernforschung der AdW in Rossendorf.

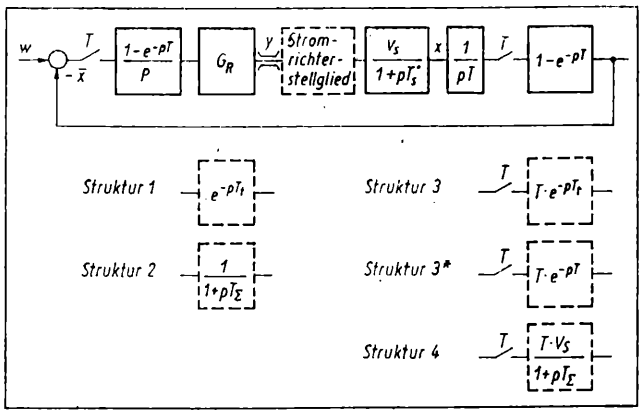



**Bild 1. Stromregelkreismodelle für Gleichstromantriebe mit Mittelwertmessung und B6C-Stromrichter**

ben für $m$ und $T_\Sigma$ berechenbar:

$$\left.\begin{array}{ll} - \text{ Struktur 1} & m \to 1/2 \\ - \text{ Struktur 3} & m \to 0\ (m \approx 1/24) \\ - \text{ Struktur 3*} & T_t = T \\ - \text{ Struktur 2} & T_\Sigma \to T/2 \\ - \text{ Struktur 4} & T_\Sigma \to T\,, \end{array}\right\} \quad (5)$$

wobei $T_t = (1 - m)\,T$ ist.

Ausgehend von dieser stationären Überprüfung kann das Verhalten des realen Antriebs mit Simulationsergebnissen für alle Strukturen bei $V_R = (\frac{1}{2}\,\overline{V}_{Ropt};\ \overline{V}_{Ropt},\ 2\,\overline{V}_{Ropt})$ und sprungförmiger Sollwertänderung verglichen werden (Bild 2). Deutliche Unterschiede im Verhalten des geschlossenen Kreises bei Variation des Stromrichtermodells treten nur bei einer wesentlich zu groß eingestellten Reglerverstärkung auf (Bild 2c). Die Überschwingweiten $h_{ü}$ liegen dabei im Bereich von (23 ... 57)%. Es ergeben sich 2 Schlußfolgerungen:

- Ausgehend von der „sicheren Seite" $V_R \leqq \overline{V}_{Ropt}$ sind alle Modelle gleichberechtigt.
  Setzt man voraus, daß ein Halteglied bezüglich des Eingangssignals eine Totzeit von $T_{tHG} = T/2$ erzeugt, ein Abtaster zwischen Regelstrecke und Halteglied aber entkoppelt, d. h. diese Totzeit unwirksam macht, so gilt für alle 5 Modelle die Beziehung:

  $$T_{tges} = T_{tHG} + T_t + T_\Sigma \approx T = 3{,}3\ \text{ms}$$

  Bild 1 und (5) belegen diese Aussage. Ist im Modell keine Totzeit explizit definiert, wird durch $T_\Sigma$ der Wert $x(T) = f(T_A, T_\Sigma, V_S, T)$ so beeinflußt, daß $T_{tges} \approx T$ entsteht.
- Ein Vergleich mit dem praktischen Verhalten bei zu hoher Verstärkung kann eine Wertung der Stromrichtermodelle ermöglichen.

*Quantitative Auswertung an unterschiedlichen Arbeitspunkten*

1) $V_R = \frac{1}{2} \cdot \overline{V}_{Ropt}$ (Bild 2a)

   Oszillogramm: $x \approx w$ nach 12 ... 14$T$
   Simulation: $x \approx w$ nach 14$T$

   Die Zeitangaben berücksichtigen die Totzeit nicht, da der Zeitpunkt des Sollwertsprunges nicht mit oszillografiert werden konnte.

2) $V_R = \overline{V}_{Ropt}$ (Bild 2b) für $h_{ü} \neq 5\%$ ist neben der arbeitspunktabhängigen Verstärkung eine relativ grobe Einstellung von $V_R$ verantwortlich ($\approx 10\%$). Das ergibt sich entsprechend [3] durch die aus Rechenzeit- und Speicherplatzgründen bedingte Realisierung des Stromregelalgorithmus mit 16-bit-Festkommaarithmetik im Einchipmikrorechner U882.

**Tafel 1. Mathematische Beschreibung und Regleroptimierung der Regelkreismodelle nach Bild 1**

| Struktur | Stromrichternäherung | Gesamtübertragungsfunktion der Regelstrecke | Berechnungsgleichungen für Streckenparameter im $z$-Bereich mit $a = \frac{T}{T_s}$, $b = \frac{T}{T_\Sigma}$, $0 < m < 1$ | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Totzeitglied $T_t = (1 - m)\,T$ | $\frac{z^{-1}(1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2})}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1})}$ | $n_1 = [\ldots]^{-1} \cdot \{(1 + e^{-a} - 2e^{-ma}) + a(1 - m(1 + e^{-a}))\}$<br>$n_2 = [\ldots]^{-1} \cdot \{(e^{-ma} - e^{-a}) + a(m - 1)e^{-a}\}$<br>$\frac{n_0}{m_0} = \frac{V_S}{a}[\ldots]$<br>$[\ldots] = [am - (1 - e^{-ma})]$ | $m_1 = -e^{-a}$ |
| 2 | Verzögerungsglied | $\frac{z^{-1}(1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2})}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2})}$ | $n_1 = [\ldots]^{-1} \cdot \{b^2(e^{-a} - e^{-b} - 1 + e^{-(a+b)} + a(e^{-a} + e^{-b})) + a^2(e^{-a} - e^{-b} + 1 - e^{-(a+b)} - b(e^{-a} + e^{-b}))\}$<br>$n_2 = [\ldots]^{-1} \cdot \{b^2(e^{-b} - (1 + a)e^{-(a+b)}) - a^2(e^{-a} - (1 + b)e^{-(a+b)})\}$<br>$\frac{n_0}{m_0} = \frac{V_S}{ab(a - b)}[\ldots]$<br>$[\ldots] = [b^2(1 - e^{-a} - a) - a^2(1 - e^{-b} - b)]$ | $m_1 = -(e^{-a} + e^{-b})$<br>$m_2 = +e^{(-a+b)}$ |
| 3 | Abtaster und Totzeitglied $T_t = (1 - m)\,T$ | $\frac{z^{-1}(1 + n_1 z^{-1})}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1})}$ | $n_1 = [\ldots]^{-1}(e^{-ma} - e^{-a})$<br>$\frac{n_0}{m_0} = V_S[\ldots]$<br>$[\ldots] = 1 - e^{-ma}$ | $m_1 = -e^{-a}$ |
| 3* | Abtaster und Totzeitglied $T_t = T$ | $\frac{z^{-1}}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1})}$ | $\frac{n_0}{m_0} = V_S[1 - e^{-a}]$ | $m_1 = -e^{-a}$ |
| 4 | Abtaster und Verzögerungsglied | $\frac{z^{-1}(1 + n_1 z^{-1})}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2})}$ | $n_1 = [\ldots]^{-1} \cdot \{be^{-b} - ae^{-a} + (a - b)e^{-(a+b)}\}$<br>$\frac{n_0}{m_0} = \frac{V_S}{(a - b)}[\ldots]$<br>$[\ldots] = [(a - b) + be^{-a} - ae^{-b}]$ | $m_1 = -(e^{-a} + e^{-b})$<br>$m_2 = +e^{-(a+b)}$ |

3) $V_R = 2 \cdot \overline{V}_{Ropt}$ (Bild 2c). Der Verlauf der Mittelwerte der unteren Hüllkurven entspricht etwa dem Verlauf bei Simulation nach Struktur 1; der Verlauf der oberen Hüllkurven entspricht etwa dem Verlauf bei Simulation mit Struktur 3* (bzw. 3). Das etwas stärkere Überschwingen des realen Systems entspricht der theoretischen Erwartung.

Damit zeigt sich, daß Totzeit/Abtaster-Näherungen (Modelle 1, 3, 3*) besser als $PT_1$/Abtaster-Näherungen (Modelle 2, 4) das Verhalten der Regelstrecke beschreiben. Die Strukturen 1, 3 und 3* können als gleichberechtigt betrachtet werden. Jedoch stellt Struktur 3* das gesuchte Vorzugsmodell dar. Durch den Beweis der Zulässigkeit des einfachsten Modells (nur 2 Variablen, vgl. Tafel 1) bestehen günstige Voraussetzungen für die Berechnung einfacher Adaptionsalgorithmen [4] oder für die EEZ-Optimierung [2]. Die Brauchbarkeit von Struktur 3* kommt auch bei Überprüfung der Stabilitätsgrenze zum Ausdruck. Der Einsatz stabiler Grenzschwingungen erfolgt:

- praktisch am Antrieb gemessen bei $V_R = 15{,}5$
- theoretisch berechnet bei $V_R = \dfrac{1}{V_S(1 - e^{-T/T_S})} = 17{,}9.$

Für die Optimierung der DDC-Stromregelung von Gleichstromantrieben mit B6C-Stromrichtern leiten sich folgende Empfehlungen ab:

- $d_1 = -e^{-T/T_S} \quad \left(\approx \dfrac{T}{T_S} - 1, \text{ wenn } T \ll T_S\right)$ (6)
- die Berechnung von $V_R$ nach 3* ist ausreichend, eine Überprüfung ist mit 1 am sichersten.

Die mit (4) für 3* berechnete Beziehung:

$$V_R = \frac{1}{3V_S(1 - e^{-T/T_S})} \tag{7}$$

**(Tafel 1. Fortsetzung)**

| Verstärkung eines digitalen PI-Reglers mit $d_1 = -e^{-a}$ und $V_R$ nach (4) |
|---|
| $\dfrac{m_0}{n_0} \cdot \dfrac{1}{1 + 3n_1 + 5n_2}$ |
| $\dfrac{m_0}{n_0} \cdot \dfrac{(1 - e^{-b})^2}{(1 + e^{-b}) + (3 - e^{-b})n_1 + (5 - 3e^{-b})n_2}$ |
| $\dfrac{m_0}{n_0} \cdot \dfrac{1}{1 + 3n_1}$ |
| $\dfrac{m_0}{n_0} \cdot \dfrac{1}{3}$ |
| $\dfrac{m_0}{n_0} \cdot \dfrac{(1 - e^{-b})^2}{(1 + e^{-b}) + (3 - e^{-b})n_1}$ |

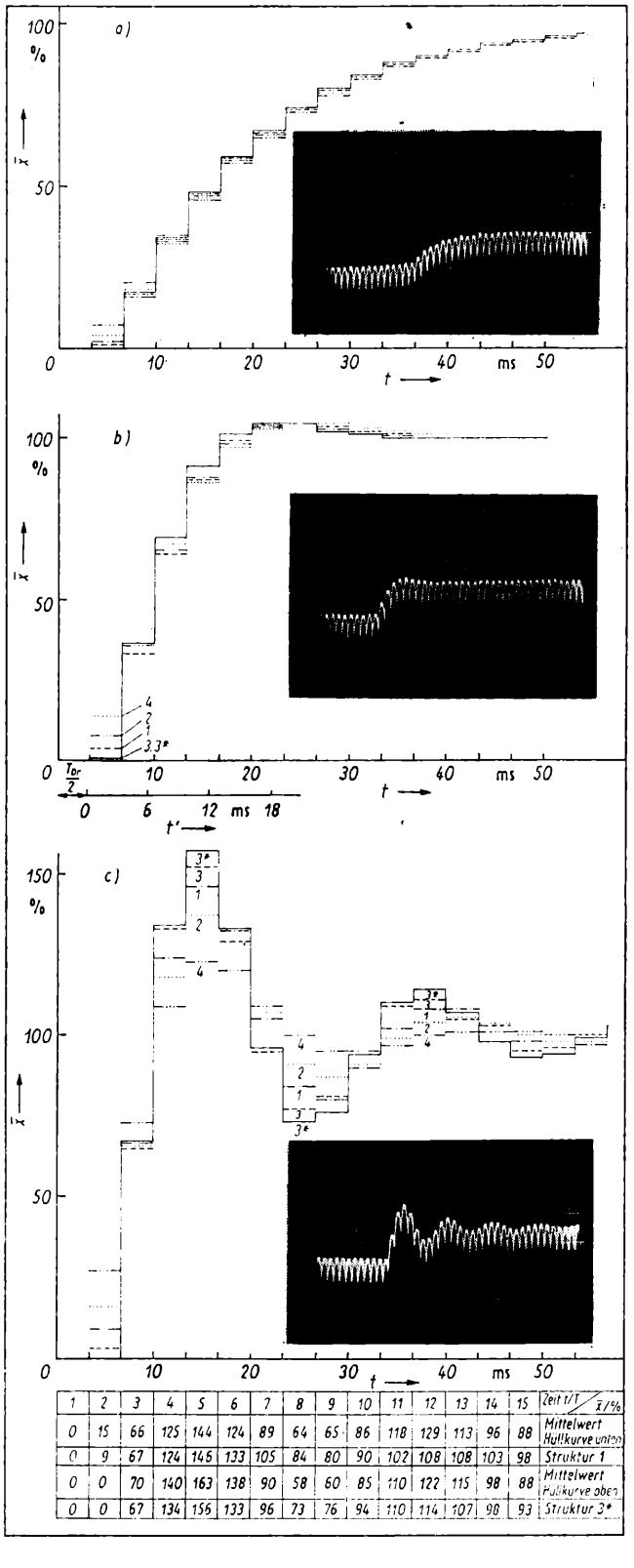
bzw. deren Näherungen

*1. Ordnung* $V_R \approx \dfrac{T_S}{3V_S T}$ (7a)

*2. Ordnung* $V_R \approx \dfrac{T_S}{3V_S T\left(1 - \dfrac{T}{2T_S}\right)}$ (7b)

**Bild 2. Sprungantwort des Stromregelkreises**

**a) mit $V_{Ropt}/2$; b) mit optimaler Reglereinstellung; c) mit $2V_{Ropt}$**
**Näherungsweise Beschreibung von $\bar{x}$ mit verschobener Zeitachse $t'$ durch: $\bar{x}(n) = A \cdot w(n-1) + B \cdot w(n-2) + C \cdot w(n-3)$ für b)**




| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Zeit t/T / $\bar{x}$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 15 | 66 | 125 | 144 | 124 | 89 | 64 | 65 | 86 | 118 | 129 | 113 | 96 | 88 | Mittelwert Hüllkurve unten |
| 0 | 9 | 67 | 124 | 145 | 133 | 105 | 84 | 80 | 90 | 102 | 108 | 108 | 103 | 98 | Struktur 1 |
| 0 | 0 | 70 | 140 | 163 | 138 | 90 | 58 | 60 | 85 | 110 | 122 | 115 | 98 | 88 | Mittelwert Hüllkurve oben |
| 0 | 0 | 67 | 134 | 156 | 133 | 96 | 73 | 76 | 94 | 110 | 114 | 107 | 98 | 93 | Struktur 3* |

stellen ähnlich einfache Beziehungen dar, wie sie mit

$$T_0 = 2V_S T_\Sigma \quad \text{bzw.} \quad V_R = \frac{T_S}{2V_S T_\Sigma} \tag{8}$$

für das Betragsoptimum analoger Systeme (BOA) bekannt sind. Praktisch kann stets mit der sehr guten Näherungsbeziehung nach (7b) gearbeitet werden. Soll (7a) Anwendung finden, so liegen die Ergebnisse stets auf der sicheren Seite (aperiodischer Grenzfall). Ein Vergleich von (7a) und (8) zeigt, daß mit guter Näherung BOA verwendet werden könnte, wenn

$$T_\Sigma = 1{,}5 \cdot T \tag{9a}$$

angesetzt wird.

Das entspräche Struktur 2 mit Beschreibung des Stromrichters als $PT_1$-Glied bei $T_\Sigma \approx T/2$, wobei die abtastende Arbeitsweise durch Zuschlag der Abtastzeit $T$ zur Summenzeitkonstante berücksichtigt wird. Somit ist ein Zusammenhang zwischen dieser bekannten, für $T_S \gg T$ zulässigen Aussage und dem BOD hergestellt, denn die gleiche Zulässigkeitsbedingung gilt für (7a). Vergleicht man (7b) mit (8), so kommt die Abhängigkeit von $T_S$ direkt zum Ausdruck:

$$T_\Sigma = 1{,}5 \cdot T \cdot \left(1 - \frac{T}{2T_S}\right). \tag{9b}$$

## 3. Modellbildung und Regleroptimierung für den überlagerten Regelkreis

Ein überlagerter Regelkreis ist i. allg. langsamer als der unterlagerte Regelkreis. Wenn es auf die maximale Ausnutzung der Dynamik des geregelten Systems ankommt, muß der überlagerte Regelkreis mit dem unterlagerten Regelkreis synchronisiert werden. Das bedeutet, daß beim DDC-Antrieb der Drehzahlregler mit der gleichen Abtastzeit wie der Stromregler bzw. mit einem ganzzahligen Vielfachen davon arbeiten muß. Konsequenzen hat das insbesondere für das Meßglied, das den Meßwert als Mittelwert über die Abtastzeit bildet, da diese nicht quarzgenau ist, sondern von der Netzfrequenz abhängt. Bei netzfrequenzunabhängigen Stellgliedern (Pulsstellern) ist diese Betriebsweise ohne Probleme möglich.

Ansonsten kann der überlagerte Regelkreis mit einer kleineren, quarzgenauen Abtastfrequenz betrieben werden. Es ist eine Entkopplung durch Halteglieder möglich bzw. einfach dadurch, daß unter Verzicht auf ein optimales dynamisches Verhalten die Abtastfrequenz des überlagerten Kreises höchstens halb so groß gewählt wird, wie die Abtastfrequenz des unterlagerten Regelkreises. Im folgenden wird für beide genannten Grenzfälle der Drehzahlregelkreis des DDC-Antriebs behandelt.

### 3.1. *Drehzahl-/Stromregelkreis synchronisiert (mit bzw. ohne Phasenverschiebung)*

Wegen

$$T_{\text{Strom}} = \frac{\text{Netzfrequenz } (f_N)}{\text{Pulszahl } (p)} \tag{10}$$

bei Verwendung netzgeführter Stromrichter, wird i. allg. eine Umrechnung des vom Meßglied gelieferten Drehzahlistwertes in $U$/min notwendig, wenn sinnvoll angesetzt wird:

$$T_{\text{Dreh}} = K \cdot T_{\text{Strom}}$$

mit

$a_1$) $K = 1$,

$a_2$) $K = \dfrac{T_{\text{ANStrom}}}{T_{\text{Strom}}}$.

$T_{\text{Strom}}$ Abtastzeit des Stromregelkreises; $T'_{\text{ANStrom}}$ Anregelzeit des Stromregelkreises; $T_{\text{Dreh}}$ Abtastzeit des Drehzahlregelkreises

Der geschlossene Stromregelkreis stellt folglich im Fall $a_1$) ein Polynom in $z^{-1}$ und im Fall $a_2$) ein Totzeitglied dar [5]. Der erhöhte mathematische Aufwand bei einer anderen Festlegung von $K$ erscheint nicht gerechtfertigt. Wegen der notwendigen Genauigkeit im Zusammenhang mit der erforderlichen Rechenzeit muß die Synchronisation bei Einsatz der Hardware nach [3] mit einem Hauptrechner U 880 ohne Zusatzarithmetik ausgeschlossen werden.

### 3.2. *Drehzahl-/Stromregelkreis nicht synchronisiert (Entkopplung durch Halteglieder)*

Durch günstige Wahl der Meßzeit $T_{ME}$ (und damit der Abtastzeit des Drehzahlregelkreises) in Abhängigkeit vom eingesetzten Geber (z. B. IGR 2500: $T_{Me} = 6$ ms) kann eine Istwertumrechnung entfallen. Der geschlossene Stromregelkreis nach Bild 1 ist für diese Abtastzeit nicht ohne erheblichen mathematischen Aufwand berechenbar. Als Näherungen sollen betrachtet werden:

$b_1$) Polynom in $z^{-1}$ mit $T_{\text{Strom}} = T_{\text{Dreh}}$

$b_2$) Verzögerungsglied mit $T_{\text{Strom}} = T_{\text{Dreh}}$.

Entsprechende Signalflußpläne nach Bild 3 berücksichtigen die mechanisch stets vorhandene geschwindigkeitsproportionale Reibung. Die Annahme eines I-Gliedes ist unzulässig und führt zu einem Strukturfehler im z-Bereich.

Aus der theoretisch berechneten — oder praktisch gemessenen — Sprungantwort des Stromregelkreises sind die Stützpunkte für ein Differenzengleichungsglied (DGG) mit der Abtastzeit des Drehzahlregelkreises und Berücksichtigung der Mittelwertmessung (Abszisse $t'$) sowie die Zeitkonstante des Verzögerungsgliedes bestimmbar (vgl. Bild 2b):

$$- \; y_2(n) = 4{,}5[y_1(n-1) + 1{,}7y_1(n-2) + 0{,}33y_1(n-3)]$$

$$- \; T_{SS} \approx 6 \cdot \frac{T_{\text{Strom}}}{3} \quad (3 \cdot \text{Zeitkonstante} \mathrel{\hat{=}} 95\% \text{ des Endwertes}).$$

Einerseits ist für $b_1$) die Verschiebung der Zeitachse wesentlich, andererseits ist die Parameterbestimmung und Empfindlichkeit für $b_1$) deutlich günstiger als bei $b_2$).

Die Ermittlung der Integrierzeit $T_0$ kann wieder rechnergestützt durch Auswertung abgespeicherter Beschleunigungs- oder Bremsvorgänge bei Vorgabe eines Stromsollwertsprunges erfolgen. Der Rückkopplungsfaktor $K$ läßt sich nur sehr schwer bestimmen. Wenn aber für Bild 3 gelten:

$$K \leqq 1; \qquad T_{\text{Dreh}}/T_M \ll 1 \tag{11}$$

werden $d_1$ und $V_R$ näherungsweise unabhängig von $K$. Das zeigt auch die mathematische Beschreibung der beiden Drehzahlregelkreismodelle nach Tafel 2, in der die mit Hilfe von (4) berechnete Reglerverstärkung angegeben ist.

Es sind $T_{\text{Dreh}} = 6$ ms, $T_0 = 150$ ms und $K = 0{,}1$.

Bei Festlegung von

$$d_1 = -\frac{255}{256} = -0{,}9961 \qquad \left(e^{-\frac{T_{\text{Dreh}} \cdot K}{T_0}} = 0{,}9960\right)$$

wurde durch ein Adaptionsprogramm $V_{\text{Ropt}} = 170 \cdot 2^{-5} = 5{,}31$ bestimmt. Struktur 5 nähert sich diesem optimalen Wert von schwingender Einstellung, Struktur 6 von der aperiodischen Seite aus an. Die Festlegung der Summenzeitkonstante $T_{SS}$ für Struktur 5 sollte also günstig ausgehend von $i \approx i_{\text{Soll}}$ erfolgen. Während die Näherungsbeziehung für $V_R$ nach Struktur 5 keine drastische Vereinfachung erlaubt, ist das mit

$$V_R \approx \frac{T_0}{\lambda \cdot T_{\text{Dreh}}}, \qquad \lambda = 4\left(A + \frac{3}{2}B + 2C\right), \tag{12a}$$

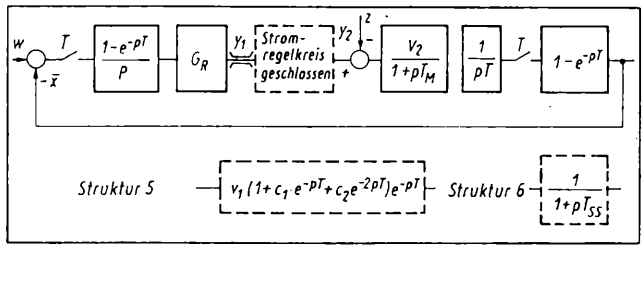
$$d_1 \approx \frac{0{,}1 \cdot T_{\text{Dreh}}}{T_0} - 1 \tag{12b}$$

für Struktur 6 der Fall. Berücksichtigt man, daß Strom- und Drehzahlregelkreis asynchron arbeiten, ist der mit (12a) und (12b) berechnete Wert $V_R = 4{,}51$ überraschend genau und er-

**Bild 3. Drehzahlregelkreismodelle mit Mittelwertmessung und asynchronem Stromregelkreis**

$V_2 = 1/K$, $T_M = T_0/K$, $K$ Drehzahlrückkopplungsfaktor

Achtung: Im Bild wurden irrtümlich die Strukturen 5 und 6 vertauscht!



laubt wiederum einen Vergleich mit BOA. Auch das Verhalten des realen geschlossenen Drehzahlregelkreises wurde für $V_R \lessgtr V_{Ropt}$ mit Simulationsergebnissen nach Struktur 5 und 6 verglichen (Bild 4). Praktisch sind beide Modelle brauchbar. Wie für $V_R$ gilt auch für die Sprungantwort, daß das reale Verhalten etwa zwischen beiden Modellen liegt. Aufgrund der Einfachheit von (12a) und der unkomplizierten Bestimmung von $\lambda$ aus einem optimalen Stromanregelvorgang erscheint Struktur 6 als zweckmäßiger, obwohl dieses Modell empfindlicher bezüglich $h_{ü}$ und $T_{AN}$ auf Änderungen des Verstärkungsfaktors reagiert.

## 4. Modellbildung und Regleroptimierung für eine überlagerte technologische Regelschleife

Wird dem DDC-Antrieb eine technologische Regelschleife überlagert, ist i. allg. eine weiter vergrößerte Abtastzeit zulässig. Die unterlagerten Regelkreise können dann als quasianalog behandelt werden, so daß bei der Optimierung des technologischen Digitalreglers keine Probleme bestehen. Im folgenden soll ein Beispiel behandelt werden, bei dem der technologische Regler im Interesse eines guten dynamischen Verhaltens mit dem Drehzahlregler des DDC-Antriebs synchronisiert ist. In diesem Fall ist wiederum eine näherungsweise Modellbildung des DDC-Antriebs im $z$-Bereich erforderlich.

Für eine Reihe von Anwendungsfällen ist die technologische Verkopplung mehrerer Antriebe durch zu bearbeitendes Material typisch. Der Signalflußplan nach Bild 5 soll als Beispiel dienen, bei dem zwischen zwei Antrieben, die beispielsweise Material (Folie, Textilien, Papier) abwickeln bzw. transportieren, ein Schlingenspeicher angeordnet ist. Aufgabe eines dem Regler nach Abschn. 3. überlagerten Durchhangreglers soll es folglich sein, den Speicher unabhängig von Transportgeschwindigkeit, Durchmesser und Brems- oder Beschleunigungsbetrieb in einer mittleren Position ($S_{Soll} = 0$) zu halten. Der in Abschn. 3. entworfene Drehzahlregler wird damit als Differenzgeschwindigkeitsregler eingesetzt und die Adaption der Verstärkung an einen sich ändernden Durchmesser vorausgesetzt. Die entsprechende Struktur des Differenzgeschwindigkeitsregelkreises zeigt Bild 6. Eine Optimierung analog zu (12a) ergibt dann für den geschlossenen Kreis

$$G_{\Delta vg}(z^{-1}) = \frac{n_1}{\Delta v_{Soll}} \approx \frac{z^{-2} \cdot \frac{1}{\lambda}(A + Bz^{-1} + Cz^{-2}) \cdot \frac{d_2}{d_1}}{(1 - z^{-1}) + z^{-2}(1 + z^{-1}) \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda} \times} = \\ \times (A + Bz^{-1} + Cz^{-1}) \\ = \frac{Z_{\Delta vg}(z^{-1})}{N_{\Delta vg}(z^{-1})} \qquad (13)$$

mit

$$V_{R\Delta v} = \frac{T_0}{\lambda \cdot T_{\Delta v}} \cdot \frac{d_2}{d_1}.$$

Bild 7 enthält das Modell des Durchhangregelkreises, das bei ausreichend genauer Adaption wieder eine konstante Verstärkung hat. Wird ein P-Regler mit $V_{RS}$ angesetzt, erhält man

$$G_{Sg}(z^{-1}) = \frac{\bar{S}_{ist}}{S_{Soll}} = \frac{V_{RS} \cdot \frac{T}{T_w} z^{-1} \cdot Z_{\Delta vg}}{(1 - z^{-1}) N_{\Delta vg} + V_{RS} \frac{T}{T_w} z^{-1} Z_{\Delta vg}}. \qquad (14)$$

**Tafel 2. Mathematische Beschreibung und Regleroptimierung der Regelkreismodelle nach Bild 3**

| Struktur | 5 | 6 |
|---|---|---|
| Näherung des geschlossenen Stromregelkreises | Verzögerungsglied $\frac{1}{1 + pT_{ss}}$ | Differenzengleichungsglied<br>$T_{Stg} = T_{Dr}$<br>$V_1(1 + c_1 e^{-pT} + c_2 e^{-2pT}) e^{-pT}$ |
| Regelstrecken-gesamtübertragungsfunktion | $\frac{z^{-1}(1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2})}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2})}$ | $\frac{z^{-2}(1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} + n_3 z^{-3})}{\frac{m_0}{n_0}(1 + m_1 z^{-1})}$ |
| Regelstreckenparameter im $z$-Bereich | $n_1 = [...]^{-1} \cdot \{b^2(e^{-a} - e^{-b} - (1 - e^{-(a+b)}) + a(e^{-a} + e^{-b})) + a^2(e^{-a} - e^{-b} + (1 - e^{-(a+b)}) - b(e^{-a} + e^{-b}))\}$<br>$n_2 = [...]^{-1} \cdot \{b^2(e^{-b} - (1 + a)e^{-(a+b)}) - a^2(e^{-a} - (1 + b)e^{-(a+b)})\}$<br>$\frac{n_0}{m_0} = \frac{V_2}{ab(a - b)}[...]$<br>$m_1 = -(e^{-a} + e^{-b}) \quad a = \frac{T}{T_M} = \frac{TK}{T_0}$<br>$m_2 = e^{-(a+b)} \quad n = \frac{T}{T_{ss}}$<br>$[...] = [b^2(1 - e^{-a} - a) - a^2(1 - e^{-b} - b)]$ | $n_1 = n_1^* + c_1$<br>$n_2 = n_1^* \cdot c_1 + c_2$<br>$n_3 = n_1^* c_2$<br>$n_1^* = [...]^{-1} \cdot \{1 - e^{-a} - a e^{-a}\}$<br>$\frac{n_0}{m_0} = \frac{V_1 V_2}{a}[...]$<br>$m_1 = -e^{-a} \quad a = \frac{T}{T_M} = \frac{TK}{T_0}$<br>$[...] = a - (1 - e^{-a})$ |
| Parameter eines digitalen PI-Reglers | $V_R = \frac{m_0}{n_0} \cdot \frac{(1 - e^{-b})^2}{(1 + e^{-b}) + (3 - e^{-b}) n_1 + (5 - 3e^{-b}) n_2}$<br>$d_1 = -e^{-a}$ | $V_R = \frac{m_0}{n_0} \cdot \frac{1}{3 + 5n_1 + 7n_2 + 9n_3}$<br>$d_1 = -e^{-a}$ |
| Abhängigkeit der Streckenverstärkung von $K$ im $z$-Bereich | $\frac{m_0}{n_0} \approx K\left(b - \frac{TK}{T_0}\right) \cdot \frac{T_0}{TK} \frac{b}{\left(\frac{b^2}{2} + 1 - e^{-b} - b\right)}$<br>$\frac{m_0}{n_0} \approx \frac{T_0}{T} \frac{b^2}{\left(\frac{b^2}{2} + 1 - e^{-b} - b\right)} \neq f(K)$<br>näherungsweise unabhängig von $K$ | $V_1 \frac{m_0}{n_0} \approx \frac{TK}{T_0} \cdot K \cdot \frac{1}{\left(\frac{TK}{T_0} - 1 + \left(1 - \frac{TK}{T_0}\right) + \frac{T^2K^2}{2T_0^2}\right)}$<br>$V_1 \frac{m_0}{n_0} = \frac{2T_0}{T} \neq f(K)$<br>näherungsweise unabhängig von $K$ |
| Näherungsbeziehung für $V_R$ | $V_R \approx \frac{T_0}{T} \cdot \frac{b(1 - e^{-b})}{2b + b^2 + 2e^{-b} + b\frac{b - 2e^{-b}}{1 - e^{-b}}}$<br>$e^{-a}$ durch Näherung 2. Ordnung ersetzt | $V_R = \frac{T_0}{T \cdot \lambda} \qquad \lambda = 4\left(A + \frac{3}{2}B + 2C\right)$<br>$e^{-a}$ durch Näherung 2. Ordnung ersetzt |

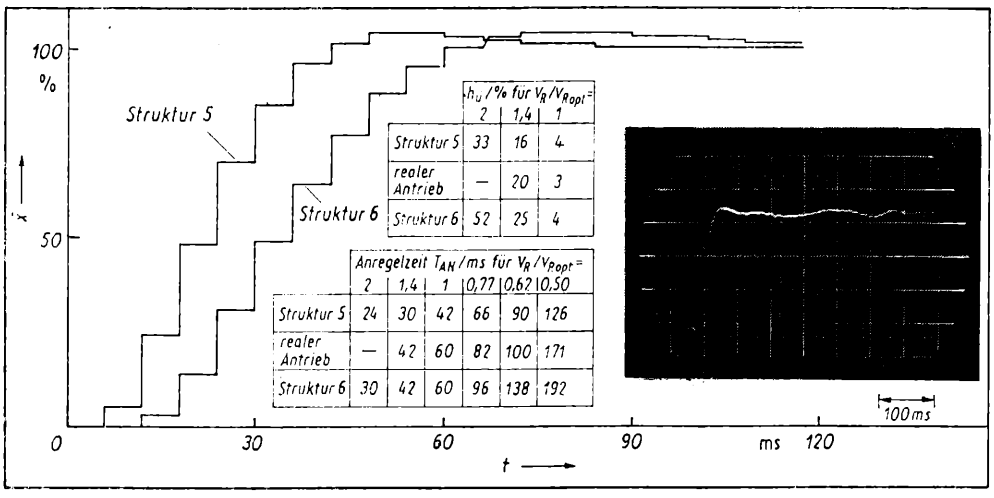



**Bild 4. Sprungantwort des Drehzahlregelkreises mit $V_{Ropt}$**

$[\Delta n_{dyn}] = (50 \ldots 70)\ \mathrm{min}^{-1}$, $[\Delta n_{stat}] < 1{,}3\ \mathrm{min}^{-1}$; belastet

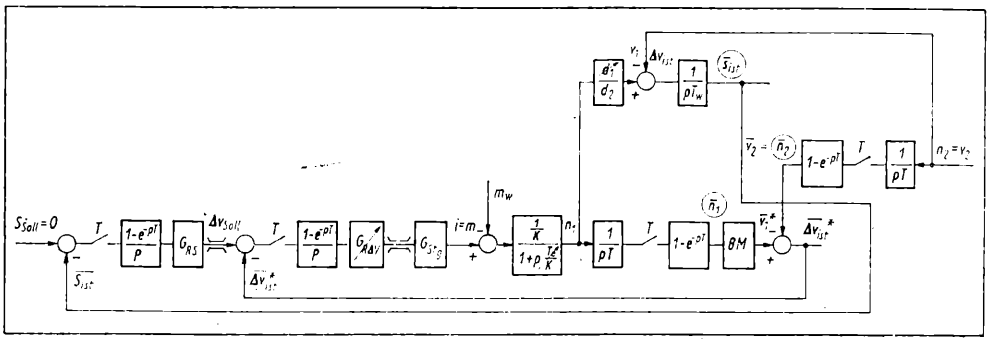



**Bild 5 .Durchhangregelkreis**

BM Berechnungsmodell; ○ gemessene Größe; * berechnete Größe

**Bild 6. Signalflußplan zur Delta-v-Regelung**

Für das Berechnungsmodell gilt entsprechend Bild 5:

$$\bar{v}_1^* = \frac{T_w}{T}\,[\bar{S}_{ist}(n) - \bar{S}_{ist}(n-1)]$$

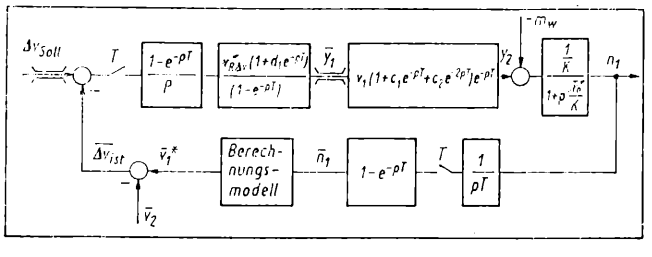
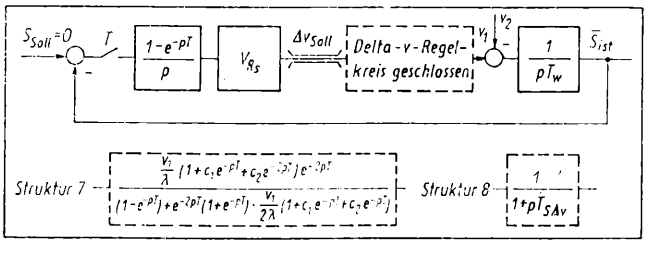



**Bild 7. Durchhangregelkreismodelle mit Differenzengleichungsglied und Verzögerungsglied**

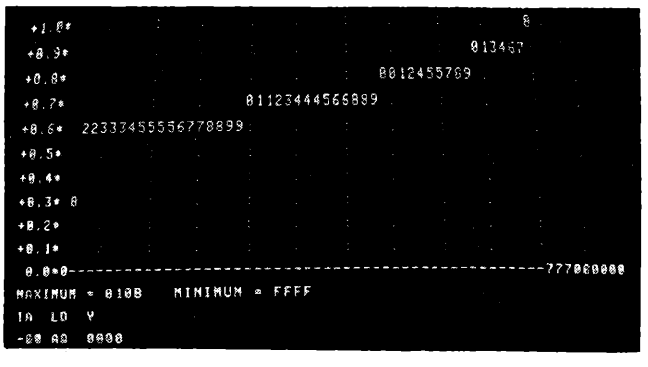



Da die Regelstrecke ein I-Glied enthält, kann (4) nicht angewendet werden. Die Reglerverstärkung wird nach [1] (dort (31)) und unter Beachtung von $(A + B + C) \stackrel{!}{=} 1$ ermittelt

$$V_{RS} = \frac{T_w}{2 \cdot T \cdot \lambda}\,. \tag{15}$$

Eine andere Möglichkeit zur Berücksichtigung des geschlossenen Differenzgeschwindigkeitsregelkreises besteht wiederum in der Annahme eines Verzögerungsgliedes

$$G_{\Delta vg}(p) = \frac{1}{1 + pT_{S\Delta v}}\,. \tag{16}$$



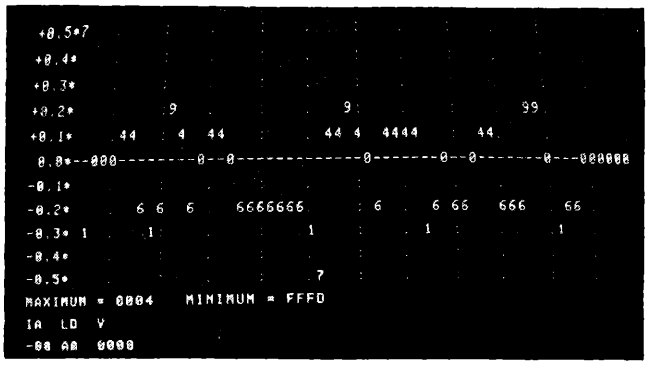




**Bild 8. Auslenkung S eines Schlingenspeichers mit Regelstruktur nach Bild 5 für Anfahrvorgang und stationäres Verhalten bei $v_2$ = 100 m/min**

Meßintervall 15 s; $d_1(0) = 250$ mm; $d_1$ (15 min) = 135 mm

oben Drehzahl $n_1$ Antrieb 1; unten Auslenkung $\bar{S}_{ist}$

In der Pseudografik wird anstelle der exakten Meßwertposition die zweite Dezimalstelle hinter dem Komma ausgegeben (Normierung auf den maximalen Meßwert)!

Maximum und Minimum sind Meßwertinkremente im Zweierkomplement.

Entsprechend Bild 7 wird dann berechnet

$$G_{Sg}(z^{-1}) = \frac{G_{RS} \cdot (1 - z^{-1}) \cdot \mathfrak{z}\left\{G_{\Delta vg}(p) \cdot \frac{1}{p^2 T_w}\right\}}{1 + G_{RS} \cdot (1 - z^{-1}) \cdot \mathfrak{z}\left\{G_{\Delta vg}(p) \cdot \frac{1}{p^2 T_w}\right\}} =$$

$$= \frac{z^{-1} \cdot V_{RS} \cdot V_0 (1 + n_1 z^{-1})}{(1 - z^{-1})(1 - e^{-a} z^{-1}) + z^{-1} V_{RS} \cdot V_0 (1 + n_1 z^{-1})} \quad (17)$$

mit

$$a = \frac{T}{T_{S\Delta v}},$$

$$n_1 = \frac{1 - e^{-a} - a e^{-a}}{a - (1 - e^{-a})}, \qquad V_0 = \frac{T_{S\Delta v}}{T_w}(a - 1 + e^{-a}).$$

Die Proportionalverstärkung ergibt sich gemäß [1] zu

$$V_{RS} = \frac{T_w}{2 T_{S\Delta v} + T}. \quad (18)$$

Wie in Abschn. 3. erläutert, ist die Festlegung von $T_{S\Delta v}$ problematisch. Da ein leicht überschwingender Vorgang durch die Sprungantwort eines Verzögerungsgliedes genähert wird, muß mindestens von $T_{AUS}$ nicht aber von $T_{AN}$ als eingeschwungenem Zustand ausgegangen werden.

Wenn für den Durchhangregelkreis $T = 6$ ms, $T_w = 15{,}2$ ms, $T_{S\Delta v} = (20 \ldots 30)$ ms und $\lambda = 5{,}54$ gelten, erhält man

$V_{RS} = 0{,}23$ nach (15)

$V_{RS} = 0{,}23 \ldots 0{,}33$ nach (18).

Bei der Erprobung des Reglers an einem Modellantrieb wurde mit $V_R = \frac{70}{256} = 0{,}27$ gearbeitet, was eine sehr gute Übereinstimmung mit den vereinfachten Regelstreckenmodellen und die praktische Brauchbarkeit von BOD beweist. Bild 8 zeigt das stationäre Verhalten des Schlingenspeicheristwertes $S_{ist}$, der nur wenige Inkremente ausgelenkt wird (maximale Auslenkung in einer Richtung 694 Inkremente). Die Materialgeschwindigkeit betrug 100 m/min. Der Modellantrieb wurde auf Grundlage von 2 DDC-Antrieben nach [3] aufgebaut und ermöglicht durch eine Zusatzservicesoftware die Abspeicherung von Istwerten mit normierter Ausgabe auf ein Display.


### Zusammenfassung

Im Beitrag werden Modelle für den unterlagerten Stromregelkreis, den überlagerten Drehzahlregelkreis sowie für weitere überlagerte technologische Regelschleifen von digital geregelten elektrischen Antrieben mit Stromrichterstellgliedern vorgeschlagen und theoretisch sowie experimentell untersucht. Eine exakte Optimierungsvorschrift für die digitalen Regler ist das Betragsoptimum nach [1], das im Beitrag in geschlossener Form allgemein formuliert wird. Auf dieser Grundlage werden für den praktischen Einsatz bedeutungsvolle Näherungen diskutiert. Die vorgeschlagenen Regelkreismodelle und Reglereinstellungen wurden praktisch erprobt.


### Literatur


[1] *Krug, H.:* Betragsoptimum für digitale Regler von elektrischen Antrieben. msr, Berlin 28 (1985) 9, S. 394–399.

[2] *Schönfeld, R.; Krug, H.; Geitner, G.-H.; Stoev, A.:* Regelalgorithmen für digitale Regler von elektrischen Antrieben. msr, Berlin 28 (1985) 9, S. 390 bis 394.

[3] *Köster, J.; Neumann, L.:* Der Einsatz von Mikrorechnern für die Steuerung und Regelung von Antrieben. VEM Technische Informationen (1986) 10, S. 11–14.

[4] *Müller, V.; Dittrich, A.:* Adaptive Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs mit Mikrorechner. msr, Berlin 29 (1986) 7, S. 298–301.

[5] *Geitner, G.-H.; Stoev, A.:* Optimiert auf endliche Einstellzeit msr, Berlin 28 (1985) 4, S. 165–169 (Teil 2).

[6] *Müller, V.; Dittrich, A.:* Digitale Drehzahlregelung von stromrichtergespeisten Gleichstromantrieben. msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 10–14. msr 8661



*G. Brack; F. Clemens*


# Zur Lösung der dynamischen Zustandsgleichung mit substantiell verteilten Zustandsgrößen

## 0. Aufgabenstellung

In Systemen mit substantiell verteilten Zustandsgrößen $q(z, t)$ sind diese Funktionen der Zeit $t$ sowie eines unabhängigen Verteilungsparameters $z \in [z_0, z_m]$ [1]. Die lineare dynamische Zustandsgleichung für die Unbekannte $q$ soll hier in dem Spezialfall betrachtet werden, in dem ein ausgearteter Integralkern vorliegt. Zur Vereinfachung wird für die bestimmten Integrale die Schreibweise

$$\int_{z_0}^{z_m} x(s)\,\mathrm{d}s = \langle x \rangle$$

eingeführt.

Damit erhält die Zustandsgleichung die Gestalt [2]

$$\frac{\mathrm{d}q(z, t)}{\mathrm{d}t} = a(z)\, q(z, t) + G(z) \langle Hq \rangle + b(z)\, u(z, t). \quad (1)$$

Gesucht sind Lösungen von (1) für die Anfangsbedingungen $q(z, t = 0) = q_0(z)$ und gegebene Zeitverläufe der Eingangsgröße $u(z, t)$, für die eine Darstellung $u(z, t) = u(z) \cdot f(t)$ möglich sein soll. Da (1) linear ist, ist die Laplace-Transformation anwendbar.

## 1. Kontinuierliche Lösung der Zustandsgleichung

Laplace-Transformation von (1) hinsichtlich der Zeit $t$ liefert mit $Q(z, p) = \mathfrak{L}\{q(z, t)\}$, $U(z, p) = \mathfrak{L}\{u(z, t)\} = u(z) \cdot F(p)$ unter Berücksichtigung der Anfangsbedingung die Beziehung

$$Q(z, p) = \frac{G(z)}{p - a(z)} \langle HQ \rangle + \frac{q_0(z)}{p - a(z)} + \frac{b(z)\, u(z)}{p - a(z)} F(p). \quad (2)$$

Das bestimmte Integral $\langle HQ \rangle$ in (2) ist eine Funktion des Laplace-Operators $p$. Abkürzend soll dafür geschrieben werden

$$\langle HQ \rangle = C(p).$$

$C(p)$ hängt nicht von $z$ ab.

Einsetzen in (2), Multiplikation mit $H$ und Integration auf beiden Seiten ergibt

$$\langle HQ \rangle = C(p) = \left\langle \frac{HG}{p - a} \right\rangle C(p) + \left\langle \frac{Hq_0}{p - a} \right\rangle + \left\langle \frac{Hbu}{p - a} \right\rangle F(p).$$

Auflösen nach der unbekannten Funktion $C(p)$ führt auf

$$C(p) = \frac{\left\langle \frac{Hbu}{p - a} \right\rangle F(p)}{1 - \left\langle \frac{HG}{p - a} \right\rangle} + \frac{\left\langle \frac{Hq_0}{p - a} \right\rangle}{1 - \left\langle \frac{HG}{p - a} \right\rangle} = C_u(p) + C_a(p). \quad (3)$$


Prof. Dr. sc. techn. *Georg Brack* (56) studierte von 1951 bis 1956 Schwachstromtechnik an der Fakultät Elektrotechnik der TH Dresden. Von 1956 bis 1961 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Regelungstechnik der TH Dresden. 1961 Promotion A. Von 1961 bis 1964 im Institut für Regelungstechnik (IfR) Berlin tätig. Seit 1964 Dozent an der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg. Dort 1968 Berufung zum ordentlichen Professor für Automatisierungstechnik. 1976 Promotion B. Leiter des Wissenschaftsbereichs Automatisierungstechnik an der Sektion Verfahrenstechnik. Vorstandsmitglied der WGMA.

Dipl.-Ing. *Frank Clemens* (25) studierte von 1982 bis 1987 an der Sektion Verfahrenstechnik der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg. Seit 1987 dort wissenschaftlicher Assistent im Wissenschaftsbereich Automatisierungstechnik.

Dieser Ausdruck ist anstelle von $\langle HQ \rangle$ in (2) einzusetzen. Als Lösung im Bildbereich erhält man damit zusammenfassend

$$Q(z,p) = C_u(p)\frac{G(z)}{p-a(z)} + \frac{b(z)\,u(z)}{p-a(z)}F(p) + C_a(p) \times \\ \times \frac{G(z)}{p-a(z)} + \frac{q_0(z)}{p-a(z)}. \tag{4}$$

Wie bei jedem linearen System besteht die Lösung aus Anteilen, die von der Störfunktion abhängen (Terme 1, 2) und solchen, die von der Anfangsbedingung herrühren (Terme 3, 4).

## 2. Pole des Systems

$a(z)$ soll in $[z_0, z_m]$ als eine kontinuierliche, monoton wachsende oder fallende Funktion von $z$ angenommen werden. $H(z)\,G(z)$ möge im gleichen Intervall nicht negativ sein. Nach (4) hat das System zunächst ein kontinuierliches Spektrum von reellen Polen

$$p = p(z) = a(z). \tag{5}$$

Weitere Pole ergeben sich aus den Nullstellen des Nenners von $C(p)$ in (3)

$$\left\langle \frac{HG}{p-a} \right\rangle = 1. \tag{6}$$

Zur Untersuchung, ob diese Gleichung komplexe Wurzeln zuläßt, wird $p = \delta + j\omega$ gesetzt. Aus (6) erhält man damit

$$\left\langle \frac{HG}{\delta - a + j\omega} \right\rangle = \left\langle \frac{HG(\delta - a - j\omega)}{(\delta-a)^2 + \omega^2} \right\rangle = \\ = \left\langle \frac{HG(\delta-a)}{(\delta-a)^2+\omega^2} \right\rangle - j\omega \left\langle \frac{HG}{(\delta-a)^2+\omega^2} \right\rangle = 1. \tag{7}$$

Der Integrand des Imaginärteils in (7) kann nach den oben gemachten Voraussetzungen nicht negativ werden. (7) ist demnach nur erfüllbar, wenn $\omega = 0$ wird. (6) kann also nur reelle Lösungen, $C(p)$ nur reelle Pole haben.
Mit $p = \delta$ (reell) erhält man also die Gleichung zur Bestimmung der Pole

$$\left\langle \frac{HG}{\delta - a} \right\rangle = 1. \tag{8}$$

Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

a) $\delta \notin [a(z_0), a(z_m)]$
In diesem Fall existiert das Integral in (8) und stellt eine monotone Funktion von $\delta$ dar. Ein Wert $\delta_1$, der die Gleichung erfüllt, läßt sich (numerisch) leicht finden.

b) $\delta \in [a(z_0), a(z_m)]$
In diesem Fall liegt in (8) ein uneigentliches Integral vor, das an der Stelle $z^*$ mit $\delta^* = a(z^*)$ eine Diskontinuität (Pol) aufweist. In diesem Fall ist der Cauchysche Hauptwert des Integrals

$$\text{v.p.}\left\langle \frac{HG}{\delta^* - a} \right\rangle = \lim_{\varepsilon \to 0}\left[\int_{z_0}^{z^*-\varepsilon} \frac{HG}{\delta^* - a}\,\mathrm{d}s + \int_{z^*+\varepsilon}^{z_m} \frac{HG}{\delta^* - a}\,\mathrm{d}s\right],$$

sofern existent, zugrunde zu legen.
Im Bild 1 ist der Wert des Integrals durch die Differenz der beiden schraffierten Flächen gegeben. Es leuchtet unmittelbar ein, daß durch Verschieben von $z^*$ beliebige positive wie auch negative Werte angenommen werden können. (8) ist damit für einen weiteren Wert $\delta = \delta_2$ zu erfüllen.

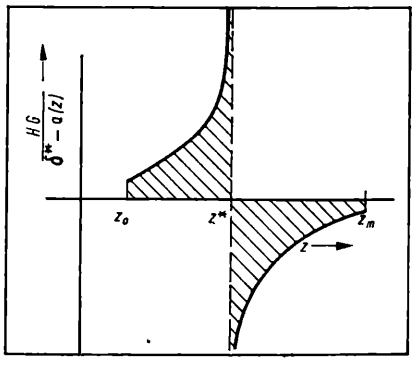



**Bild 1. Zur Ermittlung des Cauchyschen Hauptwerts des Integrals (8)**

Zusammenfassend ist somit festzustellen: Das System hat ein verteiltes reelles Polspektrum $p(z) = a(z)$ sowie zwei weitere reelle Pole $\delta_1, \delta_2$ als Lösungen von (8) in verschiedenen Bereichen. Bei bestimmten Zusammenhängen zwischen den Funktionen $a$, $G$ und $H$, die im untersuchten Anwendungsbeispiel [3] vorlagen, kann bei $p = \delta_1$ gleichzeitig eine Nullstelle von $C(p)$ auftreten, so daß sich dieser Pol herauskürzt.

## 3. Rücktransformation

Die Rücktransformation von (4) in den Zeitbereich ergibt

$$q(z,t) = G(z)\,c_u(t) * \mathrm{e}^{a(z)\,t} + b(z)\,u(z)\,f(t) * \mathrm{e}^{a(z)\,t} + \\ + G(z)\,c_a(t) * \mathrm{e}^{a(z)\,t} + q_0(z)\,\mathrm{e}^{a(z)\,t}. \tag{9}$$

Dabei bezeichnet der Stern * die Faltungsoperation gemäß

$$x_1 * x_2 = \int_0^t x_1(s)\,x_2(t-s)\,\mathrm{d}s.$$

Der zweite und vierte Term in (9) können sofort berechnet werden. Zur Auswertung des ersten und dritten Terms sind $c_u(t)$ und $c_a(t)$ als die Laplace-Rücktransformierten von $C_u(p)$ bzw. $C_a(p)$ nach (3) zu berechnen. Das kann nach dem Residuensatz erfolgen [4]. Dazu sind die Residuen zu den Polen von $C(p)$ zu ermitteln. Für $C_u(p)$ soll geschrieben werden

$$C_u(p)\,\mathrm{e}^{pt} = \frac{\left\langle \frac{Hbu}{p-a} \right\rangle F(p)\,\mathrm{e}^{pt}}{1 - \left\langle \frac{HG}{p-a} \right\rangle} = \frac{Z(p)}{N(p)}. \tag{10}$$

Das Residuum zu dem Pol erster Ordnung $p_i$ errechnet sich dann zu

$$a_i = \mathrm{Res}(p_i) = \frac{Z(p=p_i)}{N'(p=p_i)}.$$

Zur Berechnung von $N' = \dfrac{\mathrm{d}N(p)}{\mathrm{d}p}$ ist das im Nenner von (10) stehende bestimmte Integral nach dem Parameter $p$ zu differenzieren. Die Reihenfolge von Differentiation und Integration darf vertauscht werden; mithin erhält man

$$N' = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}p}\left\langle \frac{HG}{p-a} \right\rangle = -\left\langle \frac{\partial}{\partial p}\frac{HG}{p-a} \right\rangle = \\ = \left\langle \frac{HG}{(p-a)^2} \right\rangle. \tag{11}$$

Für $c_u(t)$ kann man damit schreiben

$$c_u(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left\langle \frac{Hbu}{p_i - a} \right\rangle}{\left\langle \frac{HG}{(p_i-a)^2} \right\rangle}\mathrm{e}^{p_i t} = \sum_{i=1}^{n} c_i\,\mathrm{e}^{p_i t}. \tag{12}$$

$p_1 = \delta_1$ und $p_2 = \delta_2$ sind die im Abschn. 2. berechneten reellen Pole des Systems. Weitere Pole können aus der Laplace-Transformierten $F(p)$ der Störfunktion $f(t)$ resultieren, z. B. der Pol $p_3 = 0$ für $F(p) = 1/p$, $f(t) = \sigma(t)$ (Sprungfunktion).
Auch bei der Auswertung von (12) treten uneigentliche Integrale auf, bei denen jeweils der Cauchysche Hauptwert zu nehmen ist.
Die Berechnung von $c_a(t)$ (Anteil der Anfangsbedingung) erfolgt nach einer (12) ähnlichen Beziehung, wobei $Hq_0$ an die Stelle von $Hbu$ tritt und nur die beiden Pole $\delta_1$ und $\delta_2$ vorkommen.

## 4. Zeitverläufe

Zur Ermittlung des Zeitverlaufs nach (9) sind Faltungsintegrale zu berechnen. Dabei erhält man

$$\mathrm{e}^{p_i t} * \mathrm{e}^{a(z)\,t} = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{e}^{p_i t} - \mathrm{e}^{a(z)\,t}}{p_i - a(z)} & \text{für } p_i \notin [a(z_0), a(z_m)] \\ t\,\mathrm{e}^{p_i t} & \text{für } z = z^* \text{ mit} \\ & p_i = a(z^*) \in [a(z_0), a(z_m)]. \end{cases} \tag{13}$$

Damit ist das Problem gelöst. Der Gesamtzeitverlauf ergibt sich aus den Beziehungen (9), (12) und (13).

## 5. Zeitdiskrete Lösung der Zustandsgleichung

Für die zeitdiskrete Lösung von (1) wird eine Beziehung der Form

$$q(z, t_{k+1}) = f(q(z, t_k), u(z, t_k)) \tag{14}$$

angestrebt.
Die Zeitpunkte liegen äquidistant, es gilt also:

$$t_{k+1} - t_k = T = \text{konst}\,.$$

Als Argument können dann die diskreten Zeitindizes verwendet werden

$$q(z, k+1) = f(q(z, k), u(z, k))\,. \tag{15}$$

Es soll jetzt durch Anwendung von Näherungsverfahren auf (1) eine Bildungsvorschrift ermittelt werden, die den funktionalen Zusammenhang gemäß (15) ausdrückt. Für diesen Zweck sind die Euler-Cauchy-Methode und Runge-Kutta-Verfahren $i$-ter Ordnung ($i = 4, 5, 7$) geeignet und angewendet worden. Aber auch das Ergebnis der Annäherung des Differentialquotienten in (1) durch den Differenzenquotienten entspricht dem Zusammenhang (15).

## 6. Ergebnisse der Näherungsmethoden

### 6.1. *Annäherung des Differentialquotienten durch den Differenzenquotienten*

$$\frac{\mathrm{d}q(z,t)}{\mathrm{d}t} \to \frac{q(z,k+1) - q(z,k)}{T} =$$

$$= a(z)\,q(z,k) + G(z)\,\langle Hq(k)\rangle + b(z)\,u(z,k)\,. \tag{16}$$

Die Umstellung nach $q(z, k+1)$ liefert das Ergebnis:

$$q(z,k+1) = (1 + a(z)\,T)\,q(z,k) + TG(z)\,\langle Hq(k)\rangle + Tb(z)\,u(z,k)\,. \tag{17}$$

### 6.2. *Euler-Cauchy-Methode* [5]

Wendet man diese Methode auf (1) an, gilt

$$f_k(q(k), u(k)) = aq(k) + G\langle Hq(k)\rangle + bu(k)\,, \tag{18}$$

$$\bar{q}(k+1) = q(k) + Tf_k(q(k), u(k))\,, \tag{19}$$

$$\bar{f}_{k+1}(\bar{q}(k+1), u(k)) = a\bar{q}(k+1) + G\langle H\bar{q}(k+1)\rangle + bu(k)\,. \tag{20}$$

Durch Kombination von (18) bis (20) wird

$$\bar{f}_{k+1}(\bar{q}(k+1), u(k)) \quad \text{in} \quad \bar{f}_k(q(k), u(k))$$

überführt:

$$\bar{f}_k(q(k), u(k)) = (a + a^2T)\,q(k) + (1 + aT + T\langle HG\rangle) \times G\langle Hq(k)\rangle + TG(\langle Haq(k)\rangle + \langle Hbu(k)\rangle) + (1 + aT)\,bu(k)\,. \tag{21}$$

Der Zusammenhang (15) wird durch die Verfahrensgleichung

$$q(k+1) = q(k) + \frac{T}{2}(f_k + \bar{f}_k) \tag{22}$$

hergestellt.
Zusammenfassend erhält man das Ergebnis

$$q(k+1) = \left(1 + aT + \frac{a^2T^2}{2}\right)q(k) + \left(T + \frac{aT^2}{2} + \frac{T^2}{2}\langle HG\rangle\right)G\langle Hq(k)\rangle + \frac{T^2}{2}G\,(\langle Haq(k)\rangle + \langle Hbu(k)\rangle) + \left(T + \frac{aT^2}{2}\right)bu(k)\,. \tag{23}$$

### 6.3. *Runge-Kutta-Verfahren* [6]

Mit aufsteigender Ordnung des Runge-Kutta-Verfahrens nimmt der Umfang der Herleitungen, die in der gleichen Weise wie bei der Anwendung der Euler-Cauchy-Methode erfolgt, stark zu. Es sollen deshalb nur die Ergebnisse der Anwendung des Verfahrens der 4. und 5. Ordnung dargestellt werden.

*Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung*

$$q(k+1) = \left(1 + aT + \frac{a^2T^2}{2!} + \frac{a^3T^3}{3!}\right)q(k) + \left(T + \frac{aT^2}{2!} + \frac{a^2T^3}{3!} + \left(\frac{T^2}{2!} + \frac{aT^3}{3!} + \frac{T^3}{3!}\langle HG\rangle\right) \times \langle HG\rangle + \frac{T^3}{3!}\langle HaG\rangle\right)G\langle Hq(k)\rangle + \left(\frac{T^2}{2!} + \frac{aT^3}{3!} + \frac{T^3}{3!}\langle HG\rangle\right)G(\langle Haq(k)\rangle + \langle Hbu(k)\rangle) + \frac{T^3}{3!}G(\langle Ha^2q(k)\rangle + \langle Habu(k)\rangle) + \left(T + \frac{aT^2}{2!} + \frac{a^2T^3}{3!}\right)bu(k)\,. \tag{24}$$

*Runge-Kutta-Verfahren 5. Ordnung*

$$q(k+1) = \left(1 + aT + \frac{a^2T^2}{2!} + \frac{a^3T^3}{3!} + \frac{a^4T^4}{4!}\right)q(k) + \left(T + \frac{aT^2}{2!} + \frac{a^2T^3}{3!} + \frac{a^3T^4}{4!} + \left(\frac{T^2}{2!} + \frac{aT^3}{3!} + \frac{a^2T^4}{4!}\right)\langle HG\rangle + \left(\frac{T^3}{3!} + \frac{aT^4}{4!}\right)\langle HG\rangle^2 + \frac{T^4}{4!}\langle HG\rangle^3 + \left(\frac{T^3}{3!} + \frac{aT^4}{4!} + \frac{2T^4}{4!}\langle HG\rangle\right)\langle HaG\rangle + \frac{T^4}{4!}\langle Ha^2G\rangle\right)G\langle Hq(k)\rangle + \left(\frac{T^2}{2!} + \frac{aT^3}{3!} + \frac{a^2T^4}{4!} + \left(\frac{T^3}{3!} + \frac{aT^4}{4!}\right)\langle HG\rangle + \frac{T^4}{4!}\langle HG\rangle^2 + \frac{T^4}{4!}\langle HaG\rangle\right)G(\langle Haq(k)\rangle + \langle Hbu(k)\rangle) + \left(\frac{T^3}{3!} + \frac{aT^4}{4!} + \frac{T^4}{4!}\langle HG\rangle\right) \times G(\langle Ha^2q(k)\rangle + \langle Habu(k)\rangle) + \frac{T^4}{4!}G(\langle Ha^3q(k)\rangle + \langle Ha^2bu(k)\rangle) + \left(T + \frac{aT^2}{2!} + \frac{a^2T^3}{3!} + \frac{a^3T^4}{4!}\right)bu(k)\,. \tag{25}$$

## 7. Auswertung der gewonnenen Lösungsergebnisse

Die erhaltene Ergebniskette von (17), (23), (24), (25) bis zu dem nicht dargestellten Ergebnis vom Runge-Kutta-Verfahren 7. Ordnung für $q(z, k+1)$ zeichnet sich durch einen geringer werdenden Fehler mit aufsteigendem Kettenglied aus. Das heißt der Verfahrensfehler ist von immer höherer Ordnung. Jedes Kettenglied, außer dem ersten, enthält das vorangehende vollständig. Der Zuwachs zwischen benachbarten Kettengliedern findet in Summanden seinen Ausdruck, die die diskrete Schrittweite $T$ in einer nächsthöheren Potenz enthalten. Dieser Zuwachs ist für die Gewinnung einer Bildungsvorschrift von Interesse. Als Analogieschluß zur Fortsetzung der Ergebniskette gegen $\infty$ kann man folgendes aussagen:
Es kristallisieren sich insgesamt die zwei Funktionen $q(z, k)$, $u(z, k)$, der Ausdruck $\langle Hq(k)\rangle$ und die Folge von Ausdrücken $(\langle Ha^jq(k)\rangle + \langle Ha^{j-1}bu(k)\rangle)$ mit $j = 1 \ldots \infty$ heraus, vor denen sich verschiedene Reihenentwicklungen aufbauen:

a) Der Faktor vor der Funktion $q(z, k)$ stellt die Reihenentwicklung von $e^{a(z)\,T}$ dar.

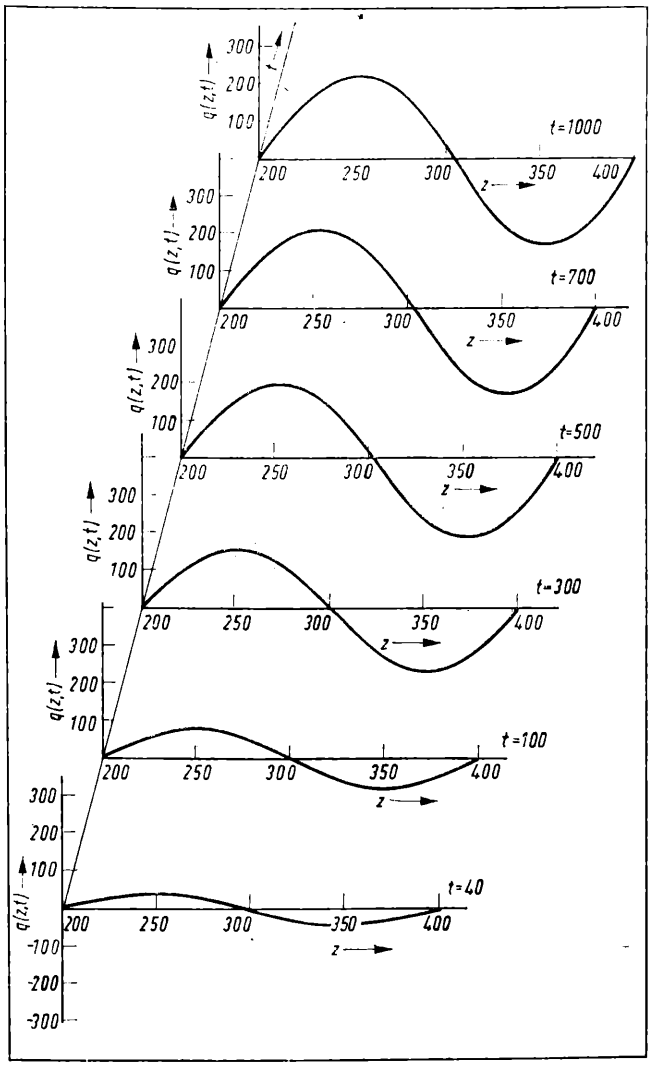



Bild 2. Verlauf von $q(z, t)$ für den 1. Berechnungsfall

b) Die Steuerfunktion $u(z, k)$ wird mit der Reihenentwicklung von

$$\frac{e^{a(z)\,T} - 1}{a(z)}\, b(z)$$

multipliziert.

c) Der Integralausdruck $\langle Hq(k)\rangle$ und die Folge der Integralausdrücke $\langle Ha^j q(k)\rangle + \langle Ha^{j-1} bu(k)\rangle$ mit $j = 1 \ldots \infty$ resultieren aus dem in (1) auftretenden Integralausdruck $G(z)\,\langle Hq(k)\rangle$.

Multipliziert werden diese Integralausdrücke mit Funktionen $v_i(z)$, die sich aus einer rekursiven Vorschrift, in denen die Systemfunktionen $a(z)$, $G(z)$ und das Integral $\langle H \ldots\rangle$ auftauchen, ergeben.

Die diskrete Schrittweite $T$ tritt, wie bei der Reihenentwicklung der Exponentialfunktion $e^{a(z)\,T}$, mit Potenzen auf, die sich auch zahlenmäßig zur Fakultät im Nenner darstellen.

## 8. Formulierung der Bildungsvorschrift für $q(z, k + 1)$

Zusammengefaßt läßt sich die Bildungsvorschrift, gemäß der Zielsetzung (15) zur Lösung von (1) angeben

$$q(z, k+1) = e^{a(z)\,T}\, q(z, k) + \sum_{i=1}^{\infty} v_i(z)\, \frac{T^i}{i!}\, \langle Hq(k)\rangle + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} v_i(z)\, \frac{T^{i+j}}{(i+j)!}\, (\langle Ha^j q(k)\rangle + \langle Ha^{j-1} bu(k)\rangle) + \frac{e^{a(z)} - 1}{a(z)}\, b(z)\, u(z, k)\,. \tag{27}$$

Die Funktionen $v_i(z)$ ergeben sich rekursiv aus

$$v_1(z) = G(z)\,, \tag{27.1}$$

$$v_{i+1}(z) = a(z)\, v_i(z) + G(z)\, \langle Hv_i\rangle\,, \qquad i \geqq 1 \tag{27.2}$$

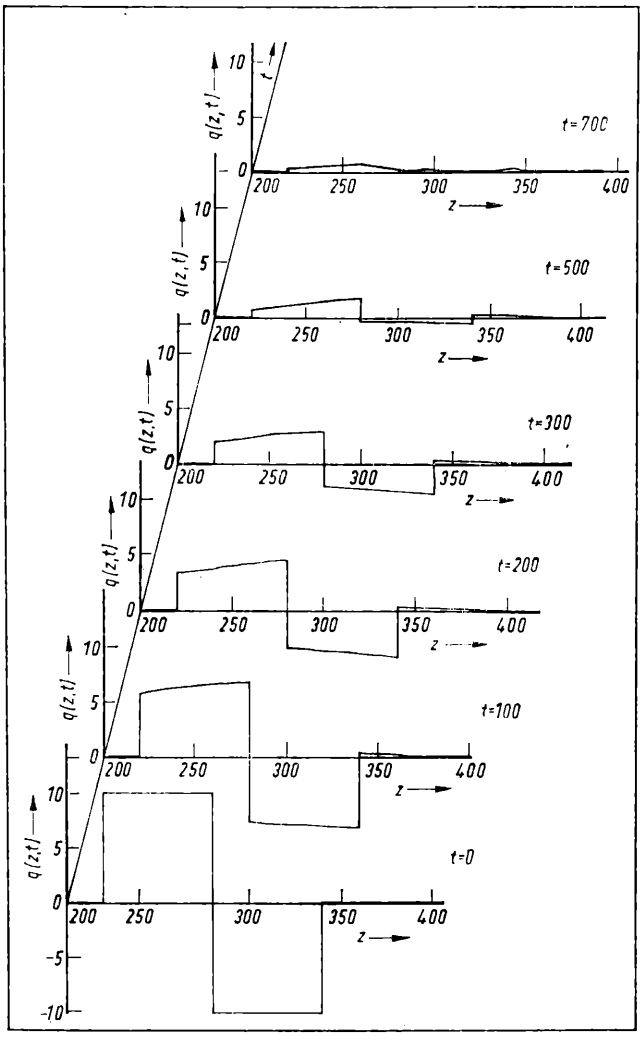



Bild 3. Verlauf von $q(z, t)$ für den 2. Berechnungsfall

oder durch

$$v_1(z) = G(z)\,, \tag{27.3}$$

$$v_i(z) = G(z)\, \left(a(z)^{i-1} + \sum_{l=0}^{i-2} K_{i-2-l} a^l\right), \qquad i \geqq 2\,. \tag{27.4}$$

Die Konstanten $K_m$ lassen sich durch das bestimmte Integral

$$K_m = \langle Hv_{m+1}\rangle\,, \qquad m \geqq 0\,, \tag{27.5}$$

ermitteln.

## 9. Beispiel

Zur Berechnung des Systems, das als Beispiel dienen soll, wurde die zeitdiskrete Lösung (27) herangezogen. Die unendlichen Reihen in (27) konnten mit genügender Genauigkeit durch 6 Summanden angenähert werden.

Untersucht wurde das System:

- $z \in [200, 400]$
- $a(z) = -0{,}001 - 1/z$
- $G(z) = \frac{1}{N}\left(\frac{\sin\left(\frac{z - 200}{200}\,\pi\right)}{z}\right)^2, \qquad N = 0{,}0011625$
- $H(z) = 1/z$
- $b(z) = \sin\left(\frac{z - 200}{100}\,\pi\right)$.

Die Abtastung erfolgte mit $T = 20$. Zur Diskretisierung der $z$-Achse wurde $\Delta z = 4$ gesetzt, also mit 50 Stützstellen für die verteilte Zustandsgröße $q(z, t)$ gerechnet.

*1. Berechnungsfall*

Die Anfangsbedingung $q(z, t_0)$ soll null sein.

Die Störung des Systems zum Zeitpunkt $t_0$ erfolgte mit $u(z, t) = \sigma(t)$. Bild 2 zeigt die sich ergebenden Verteilungen $q(z, t)$ zu bestimmten Zeitpunkten.

*2. Berechnungsfall*

Das System wird ungestört betrachtet. Bild 3 gibt die Anfangsbedingung $q_0(z)$ und die resultierenden Verteilungen $q(z, t)$ wieder.

**Schlußbetrachtungen**

Dynamische Systeme mit substantiell verteilten Zustandsgrößen stellen eine neue Klasse dar, die zu denen mit diskreten sowie örtlich verteilten Zustandsgrößen hinzutritt.
Auch für solche Systeme lassen sich Aufgaben der Modellierung, Lösung der Modellgleichungen, Steuerung und Beobachtung formulieren, von denen im Beitrag zunächst die Lösungen der dynamischen Gleichungen in kontinuierlichem wie auch diskontinuierlichem Zeitmaßstab behandelt worden sind, und zwar für den Sonderfall ausgearteter Integralkerne und einer einzigen Unbekannten. Insgesamt bietet das Gebiet noch eine Fülle weiterer Probleme und damit Ansätze für wissenschaftliche und praktische Arbeiten kommender Jahre.

**Literatur**


[1] *Brack, G.:* Zustandsgleichungen mit substantiell verteilten Zustandsgrößen msr, Berlin 29 (1986) 4, S. 172–174.
[2] *Brack, G.:* Modellierung mit substantiell verteilten Zustandsgrößen. 15. Jahrestagung Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik, Rostock 1986, Kurzreferate S. 52/142–52/146.
[3] *Rebboz, G.:* Dynamische Modellierung von Erdöldestillationskolonnen nach der Methode der verteilten Zustandsgrößen zur Vorbereitung des Entwurfs von Automatisierungssystemen. Dissertation A, TH Leuna-Merseburg 1987.
[4] *Doetsch, G.:* Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace-Transformation. München: R. Oldenbourg Verlag 1956.
[5] *Kopchenova, N. V.; Maron, I. A.:* Computational Mathematics. Moskau: Mir Publishers 1975.
[6] *Michlin, D. G.; Smolizki, Ch. L.:* Näherungsmethoden zur Lösung von Differential- und Integralgleichungen. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1969.


msr 8734


*A. Scholz; G. Schulz*


# Strukturelle Analyse von Mehrgrößensystemen als Vorstufe der Berechnung strukturbeschränkter Regler

## 0. Einleitung

Die Fortschritte auf dem Gebiet der Automatisierungsanlagen mit Mikrorechnern ermöglichen es heute, immer größere technische Systeme in Regelungsaufgaben einzubeziehen [1]. Eine große Bedeutung bei der Regelung von solchen komplexen Systemen hat die Anwendung strukturbeschränkter Rückführungen, wie die dezentrale Regelung. Die häufige und wichtige Aufgabe der Prozeßstabilisierung auf der untersten, d. h. prozeßnahen Ebene ist immer dann vergleichsweise einfach lösbar, wenn das zu regelnde Großsystem aus Teilsystemen besteht, die nicht wechselseitig miteinander verkoppelt sind. Für jedes nicht wechselseitig mit einem anderen verbundene Teilsystem löst dann ein dezentraler Teilregler diese Aufgabe. Für den Regelungstechniker ist es daher wichtig, über einfache Methoden zu verfügen, die die Dekomponierbarkeit eines Großsystems in nicht wechselseitig verkoppelte Teilsysteme zu überprüfen gestatten. Läßt sich das Großsystem zerlegen, ist zu prüfen, ob alle Teilsysteme steuerbar und beobachtbar sind, da sonst oft schon die Minimalforderung nach Prozeßstabilisierung nicht erfüllt werden kann.
Da viele Systemeigenschaften strukturellen Charakter tragen und gerade bei Großsystemen die Parameterunsicherheiten schlecht abschätzbar sind, bietet sich hier die strukturelle Analyse solcher Systeme an. Außerdem bringt sie auch eine wesentliche Einsparung von Rechenzeit und Speicherplatz im Vergleich zu numerischen Prozeduren, da nur logische Operationen und Operanden verwendet werden, und bietet den Vorteil, daß keine numerischen Probleme, wie Stabilitätsprobleme, auftreten. In diesem Beitrag soll gezeigt werden, welche Überlegungen zu treffen sind, bevor man den eigentlichen Reglerentwurf durchführt. Es zeigt sich, daß eine systematische Vorgehensweise den Aufwand für die Reglerberechnung stark reduziert.
Nach einer kurzen Vorstellung eines Dekompositionsalgorithmus für Mehrgrößensysteme soll auf spezielle Aspekte, wie die strukturelle Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit, sowie auf die Berechnung des strukturellen Ranges eingegangen werden. Abschließend wird ein Beispiel behandelt.

## 1. Strukturelle Dekomposition

Den Ausgangspunkt für die Dekomposition bildet ein um den Arbeitspunkt linearisiertes kontinuierliches Zustandsraummodell der Form:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{S}:\ & \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t)\,, \\ & \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t)\,, \\ & \boldsymbol{x}(t) \in \boldsymbol{R}^n\,, \quad \boldsymbol{u}(t) \in \boldsymbol{R}^m\,, \quad \boldsymbol{y}(t) \in \boldsymbol{R}^r\,. \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

Die Struktur eines solchen Systems läßt sich durch den Digraphen

$$\boldsymbol{D} = (\boldsymbol{U} \vee \boldsymbol{X} \vee \boldsymbol{Y}, \boldsymbol{Z})$$

mit

$\boldsymbol{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ Menge der Eingangsknoten,
$\boldsymbol{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ Menge der Zustandsknoten,
$\boldsymbol{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_r\}$ Menge der Ausgangsknoten,

$$\left.\begin{aligned} &(x_j, x_i) \in \boldsymbol{Z} \\ &(u_j, x_i) \in \boldsymbol{Z} \\ &(x_j, y_i) \in \boldsymbol{Z} \end{aligned}\right\} \text{ wenn und nur wenn } \left\{\begin{aligned} a_{ij} &\neq 0 \\ b_{ij} &\neq 0 \\ c_{ij} &\neq 0 \end{aligned}\right.$$

beschreiben.
Ein solcher Digraph stellt die strukturellen Eigenschaften von $\boldsymbol{S}$ dar. Er ist unabhängig von den konkreten Zahlenwerten der von Null verschiedenen Matrixelemente $a_{ij}$, $b_{ij}$, $c_{ij}$. Mit Hilfe dieses Strukturgraphen ist es möglich, verschiedene Streckeneigenschaften auch bei unvollständig bekanntem Modell zu analysieren [2] bis [5].

### *1.1. Einige Grundlagen*

Die Dekomposition basiert auf einem in [6] vorgestellten Algorithmus zur hierarchischen Dekomposition großer dynamischer Systeme. Es wird von einer Beschreibung des Digraphen in Form einer quadratischen Strukturmatrix $\boldsymbol{R}$

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_B & \boldsymbol{B}_B & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{C}_B & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{2}$$

der Ordnung $n + m + r$ ausgegangen. Dabei stellen $\boldsymbol{A}_B$, $\boldsymbol{B}_B$, $\boldsymbol{C}_B$ die strukturellen Abbilder der systembeschreibenden Matrizen $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ dar. Um alle existierenden Verbindungen in Digraphen zu erkennen, wird die Erreichbarkeitsmatrix $\bar{\boldsymbol{R}}$ berechnet:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R} + \boldsymbol{R}^2 + \boldsymbol{R}^3 + \dots + \boldsymbol{R}^{n+m+r}$$

$$\bar{\boldsymbol{R}} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{A}}_B & \bar{\boldsymbol{B}}_B & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \bar{\boldsymbol{C}}_B & \bar{\boldsymbol{H}} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

---


Dipl.-Ing. *Andreas Scholz* (27) studierte von 1981 bis 1986 an der TH bzw. TU „*Otto von Guericke*" Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik. Zur Zeit Forschungsstudent am Wissenschaftsbereich Regelungstechnik und Prozeßsteuerungen der oben genannten Einrichtung.

Dr. sc. nat. *Günther Schulz* (47) studierte von 1957 bis 1962 an der TU Dresden Mathematik. Anschließend ein Jahr wissenschaftlicher Mitarbeiter im VEB Mineralölwerk Lützkendorf. Von 1963 bis 1977 wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent an der Sektion Mathematik der Bergakademie Freiberg. 1968 Promotion A, 1972 Promotion B. Seit 1977 Dozent an der Sektion Mathematik und Physik der TH bzw. TU „*Otto von Guericke*" Magdeburg.

Ist $\bar{r}_{ij} = 1$, so existiert ein Pfad vom Knoten $j$ zum Knoten $i$. Für einen Regler-, Filter- bzw. Beobachterentwurf ist es notwendig, daß alle Teilsysteme sowohl eingangs- als auch ausgangsverbunden (E/A-verbunden) sind.

Der Digraph ist eingangsverbunden, wenn $\bar{B}_B$ keine Nullzeile enthält, und er ist ausgangsverbunden, wenn $\bar{C}_B$ keine Nullspalte enthält.

Der Dekompositionsalgorithmus sichert die E/A-Verbundenheit aller Teilsysteme.

Die Dekomposition des Systems (1) erfolgt so, daß durch Permutation der Variablen von $S\,l$ hierarchisch geordnete Subsysteme mit

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^{i} A_{ij}x_j(t) + \sum_{j=1}^{i} B_{ij}u_j(t)\,,$$

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{i} C_{ij}x_j(t)\,, \qquad i = 1, 2, \ldots, l \tag{4}$$

entstehen.

Die Matrizen $A$, $B$, $C$ nehmen also eine Block-Dreieckstruktur an, d. h., die Teilsysteme

$$S_i\colon\ \dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_{ii}u_i(t)\,, \tag{5}$$

$$y_i(t) = C_{ii}x_i(t)\,, \qquad i = 1, 2, \ldots, l$$

sind nur einseitig miteinander verkoppelt.

Die Dekomposition von $S$ korrespondiert mit einer Zerlegung des Digraphen $D = (U \vee X \vee Y, Z)$ in Subgraphen $D_i = (U_i \vee X_i \vee Y_i, Z_i)$, die den Subsystemen (5) entsprechen.

Nimmt man jetzt an, es existiert eine azyklische Zerlegung des Digraphen in zwei Subgraphen, so läßt sich die Erreichbarkeitsmatrix $\bar{R}$ in folgender Weise reduzieren:

$$\tilde{R} = \begin{array}{c} \\ X_1 \\ X_2 \\ \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \\ \tilde{Y}_1 \\ \tilde{Y}_2 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} X_1 & X_2 & \tilde{U}_1 & \tilde{U}_2 & \tilde{Y}_1 & \tilde{Y}_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccccc} x & 0 & e_1 & 0 & 0 & 0 \\ x & x & x & e_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_1^T & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x & e_2^T & x & 1 & 0 & 0 \end{array}\right] \end{array} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_B & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ G & \tilde{H} & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

mit $e_i^T = [1\ 1\ 1\ \ldots\ 1]$.

$x$ sind Submatrizen, die an dieser Stelle nicht weiter interessieren. $\tilde{U}_1$, $\tilde{U}_2$, $\tilde{Y}_1$, $\tilde{Y}_2$ stellen dabei jeweils die Hyperknoten

$$\tilde{U}_1 = \vee\, U_1\,, \qquad \tilde{U}_2 = \vee\, U_2\,,$$

$$\tilde{Y}_1 = \vee\, Y_1\,, \qquad \tilde{Y}_2 = \vee\, Y_2$$

dar, d. h., alle zu $U_1$ bzw. $U_2$ gehörenden Spalten in $\bar{R}$ bzw. alle zu $Y_1$ bzw. $Y_2$ gehörenden Zeilen in $\bar{R}$ werden durch Boolesches ODER miteinander verknüpft.

### *1.2. Dekompositionsalgorithmus*

Es ergibt sich folgender Dekompositionsalgorithmus:

1. Aufstellung der Strukturmatrix $R$ (2)
2. Berechnung der Erreichbarkeitsmatrix $\bar{R}$ (3)
3. Enthält die E/A-Erreichbarkeitsmatrix $\bar{H}$ kein Nullelement, ist keine Zerlegung möglich. Der Algorithmus wird mit einer Zeile gestartet, die keine andere Zeile dominiert (man sagt, daß in $\bar{H}$ die $p$-te Zeile die $q$-te Zeile dominiert, wenn $\bar{h}_{pj} = 1$, wenn auch $\bar{h}_{qj} = 1$ und für wenigstens ein $j$ gilt $\bar{h}_{pj} = 1$, aber $\bar{h}_{qj} = 0$, $j = 1, 2, \ldots, m$).
   Die gefundene Zeile sei die Zeile $i$.

4a. Definition von Indexmengen

$$I = \{i\}$$

$$J = \{j \in (1, m) \mid \bar{h}_{ij} = 1\}$$

4b. Definition der Zerlegung von $U$ und $Y$

$$U_1 = \{u_j \in U \mid j \in J\}\,, \qquad U_2 = U - U_1\,,$$

$$Y_1 = \{\, y_i \in Y \mid i \in I\}\,, \qquad Y_2 = Y - Y_1$$

5. Ausgehend von dieser Zerlegung von $U$ und $Y$ wird die reduzierte Erreichbarkeitsmatrix $\tilde{R}$ (6) berechnet.
6. Bildung einer Prüfmatrix $S$

$$S = F \wedge G^T$$

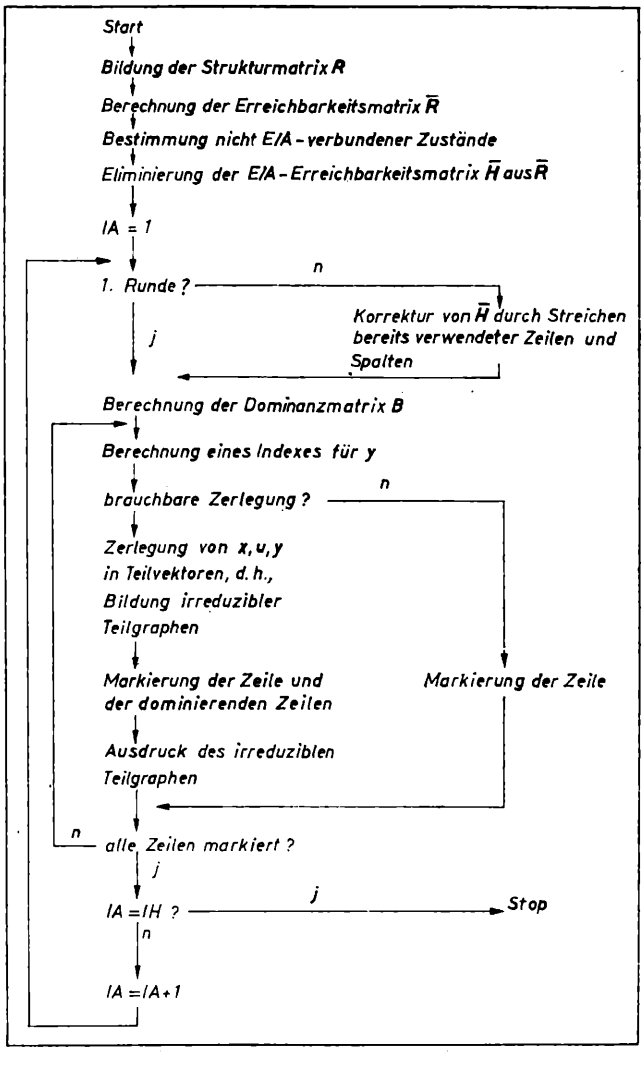
7. Wenn die Matrix $S$ eine und nur eine 1 in jeder Zeile hat, wird definiert:

$$X_1 = \{x_p \in X \mid s_{p1} = 1\}\,, \qquad X_2 = X - X_1\,.$$

   Ist die Bedingung nicht erfüllt, wird die Zeile mit (−) markiert und die Zerlegung ist mit einer anderen Zeile neu zu starten.
   Sind alle Zeilen markiert, existiert keine azyklische E/A-verbundene Zerlegung.
   Ist eine Zerlegung möglich, so wurde ein erster irreduzibler Teilgraph $D_1^1 = (U_1 \vee X_1 \vee Y_1, Z_1)$ gefunden. Der übriggebliebene Teilgraph ist eventuell weiter zerlegbar, was durch sukzessives Anwenden des Algorithmus auf $D_2^1 = (U_2 \vee X_2 \vee Y_2, Z_2)$ zu prüfen ist.
8. Die $i$-te Zeile und alle dominierenden Zeilen werden mit (+) markiert.
9. Nachdem ein erster irreduzibler Teilgraph $D_1^1$ und ein eventuell weiter zerlegbarer Rest $D_2^1$ gefunden wurden, ist zu prüfen, ob nicht unter Nutzung noch nicht markierter Zeilen von $\bar{H}$ eine andere Zerlegung $D = D_1^2 \vee D_2^2$ existiert. Das erfolgt, indem alle nicht markierten Zeilen von $\bar{H}$ entsprechend Schritt 3 geprüft werden und danach sinngemäß die Schritte 4 bis 7 abgearbeitet werden. Sind alle Zeilen von $\bar{H}$ markiert, prüft man, ob sich die Reste $D_2^k$ noch weiter zerlegen lassen. Dazu ist die Erreichbarkeitsmatrix um den irreduziblen Teilgraphen zu reduzieren und der Algorithmus von vorne zu beginnen.

Bild 1 gibt einen Überblick über die programmtechnische Realisierung des Algorithmus. Eine ausführlichere Darstellung des Dekompositionsalgorithmus findet man in [7] und [8].

**Bild 1. Übersicht über den Dekompositionsalgorithmus**



## 2. Strukturelle Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

Durch die Block- und Dreieckstruktur der Matrizen $A$, $B$ und $C$ nach der Dekomposition genügt der Nachweis, daß alle Teilsysteme steuerbar und beobachtbar sind, wenn man das Gesamtsystem stabilisieren will.

Bleibt man auch jetzt bei graphentheoretischen Mitteln, kann man die Begriffe strukturelle Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit einführen.

In Anlehnung an die Definitionen in [3] und [9] kommt man zu folgenden Aussagen:

Ein System ist strukturell steuerbar, wenn

a) der zugehörige Digraph eingangsverbunden ist
b) $\mathrm{TR}(\boldsymbol{Q}_1) = n$ (TR struktureller Rang) (7)

mit

$$\boldsymbol{Q}_1 = [\boldsymbol{A}_B \quad \boldsymbol{B}_B] .$$

Ein System ist strukturell beobachtbar, wenn

a) der zugehörige Digraph ausgangsverbunden ist
b) $\mathrm{TR}(\boldsymbol{Q}_2) = n$

mit

$$\boldsymbol{Q}_2 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_B \\ \boldsymbol{A}_B \end{bmatrix} . \tag{8}$$

Da die Dekomposition die E/A-Verbundenheit aller Teilsysteme sichert, sind also nur die Rangbedingungen zu prüfen. Die Berechnung des strukturellen Ranges ist dabei relativ einfach und soll im nächsten Abschnitt behandelt werden.

## 3. Berechnung des strukturellen Ranges

Der strukturelle Rang einer Matrix stellt den maximal möglichen numerischen Rang dar. Der Rang kann kleiner als der strukturelle Rang sein, wenn es aus numerischen Gründen zu Rangdefekten kommt. Für große Systeme sind diese Rangdefekte aufgrund der ohnehin existierenden Parameterunsicherheiten in den systembeschreibenden Matrizen jedoch nur von geringer Bedeutung.

In [2] wird der strukturelle Rang einer Matrix $A$ unter Verwendung des zugeordneten Strukturgraphen $G$ und seiner Adjazenzmatrix $A(G)$ sowie ihres Term-Ranges definiert. Die Adjazenzmatrix $A(G)$ entsteht, wenn man allen Elementen der Strukturmatrix, die ungleich Null sind, den Wert 1 zuordnet. Jedem Element $(i, j)$ mit dem Wert 1 entspricht dabei ein Pfad, der den Ausgangsknoten $j$ auf den Endknoten $i$ abbildet. Eine Teilmenge von $t$ Pfaden, die genau $t$ verschiedene Ausgangsknoten auf $t$ verschiedene Endknoten abbildet, nennt man Zuordnung. Betrachtet man die zugehörigen Elemente der Adjazenzmatrix, so kann aus jeder Zeile und jeder Spalte höchstens ein Element zur Zuordnung gehören. Solche Elemente nennt man unabhängige Elemente [10].

Der strukturelle Rang einer Matrix $A$ wurde in [2] als Term-Rang der zugehörigen Adjazenzmatrix definiert, d. h. als maximale Anzahl der Pfade in einer möglichen Zuordnung. Er ist also demnach gleich der maximalen Anzahl unabhängiger 1-Elemente der Adjazenzmatrix $A(G)$.

Die Grundlage der strukturellen Rangbestimmung bildet ein Markierungsalgorithmus zur Auswahl einer maximalen Menge unabhängiger Elemente aus einer Teilmenge der Elemente einer Matrix [10].

Man setzt voraus, daß in der $m \times n$-Matrix $m \leqq n$ gilt. Ist das nicht der Fall, wird die Matrix transponiert.

Es ergibt sich folgender Algorithmus:

1) Bestimmung einer Anfangsauswahl
   Man betrachtet der Reihe nach alle Zeilen $i = 1, 2, \ldots, m$. Gibt es in der Zeile $i$ ein 1-Element, das in einer Spalte $j$ steht, in der noch kein anderes 1-Element markiert ist, so wird das Element $(i, j)$ markiert.
2) Erste Zeilenmarkierung
   Alle Zeilen $i = 1, 2, \ldots, m$, die kein markiertes Element enthalten, werden mit $\mu(i) = 0$ markiert. (Läßt sich keine Zeile markieren, so ist die Maximalzahl der unabhängigen Elemente und damit der strukturelle Rang $m$ und der Algorithmus endet.)
3) Spaltenmarkierung
   Jetzt betrachtet man der Reihe nach alle markierten Zeilen. Enthält eine markierte Zeile $i$ ein 1-Element $(i, j)$ in einer nicht markierten Spalte $j$, so wird diese Spalte mit $\nu(j) = i$ markiert.
   Wird dabei eine Spalte $j_0$ markiert, die kein markiertes 1-Element enthält, geht man zum Schritt 5. (Konnte in Ausführung dieses Schrittes keine Spalte markiert werden, so bilden die markierten 1-Elemente eine maximale Auswahl unabhängiger Elemente und ihre Anzahl ist gleich dem strukturellen Rang.)
4) Weitere Zeilenmarkierung
   Man betrachtet nun alle nicht markierten Zeilen. Enthält eine nicht markierte Zeile $i$ ein markiertes 1-Element in einer markierten Spalte $j$, so wird diese Zeile durch $\mu(i) = j$ markiert. Nach Beendigung dieses Schrittes geht man zum Schritt 3 zurück. (Konnte in Ausführung dieses Schrittes keine Zeile markiert werden, so ist ebenso wie im Schritt 3 eine maximale Auswahl unabhängiger Elemente gefunden.)
5) Markierungsänderung
   Ist $j_0$ die Nummer der zuletzt markierten Spalte (diese enthält kein markiertes 1-Element), dann wird das 1-Element $(i_0, j_0)$ mit $i_0 = \nu(j_0)$ markiert. Ist $\mu(i_0) = 0$, dann ist Schritt 5 beendet. Andernfalls wird die Markierung am Element $(i_0, j_1)$ mit $j_1 = \mu(i_0)$ aufgehoben, und das Element $(i_1, j_1)$ mit $i_1 = \nu(j_1)$ wird markiert. Ist $\mu(i_1) = 0$, so endet Schritt 5, andernfalls wird die Markierung am Element $(i_1, j_2)$ mit $j_2 = \mu(i_1)$ aufgehoben und das Element $(i_2, j_2)$ mit $i_2 = \nu(j_2)$ markiert.
   Auf diese Weise wird fortgefahren, bis $\mu(i_t) = 0$ erreicht wird, und Schritt 5 endet.
   Nach Ausführung des Schrittes 5 ist die Zahl der gefundenen unabhängigen 1-Elemente um 1 erhöht.
   Nach Löschen aller Zeilen- und Spaltenmarkierungen wird der Algorithmus mit Schritt 2 fortgesetzt.

## 4. Beispiel

Am Beispiel eines Industrieofens [11] sollen einige Ergebnisse aus strukturellen Voruntersuchungen gezeigt werden. Das Modell des Ofens liegt in einer Zustandsraumbeschreibung vor [12]. Die Dimension $n = 20$ ergibt sich dadurch, daß die Regelstrecke ausgangsseitig um drei Integratoren erweitert wurde, um asymptotische Sollwertfolge und Störausgleich zu sichern. Der Ofen hat drei Stellgrößen und drei Regelgrößen. Die Regelung soll so erfolgen, daß nur die Ausgangsgrößen rückgeführt werden. Das entsprechende strukturelle Zustandsraummodell ist in der Tafel dargestellt.

Die Abarbeitung des Dekompositionsalgorithmus ergibt, daß das System nicht in einseitig gekoppelte Teilsysteme zerfällt.

**Tafel. Strukturelles Zustandsraummodell des Ofens**

$$\boldsymbol{A}_B = \begin{bmatrix}
1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0\\
1&0&1&0&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&1&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0
\end{bmatrix}, \quad
\boldsymbol{B}_B = \begin{bmatrix}
1&0&0\\
1&0&0\\
0&0&0\\
1&0&0\\
0&0&0\\
1&0&0\\
0&1&0\\
0&1&0\\
0&1&1\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&1&0\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&0&0\\
0&0&0
\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C}_B = \begin{bmatrix}
1&0&1&0&1&1&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&1&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1
\end{bmatrix}.$$

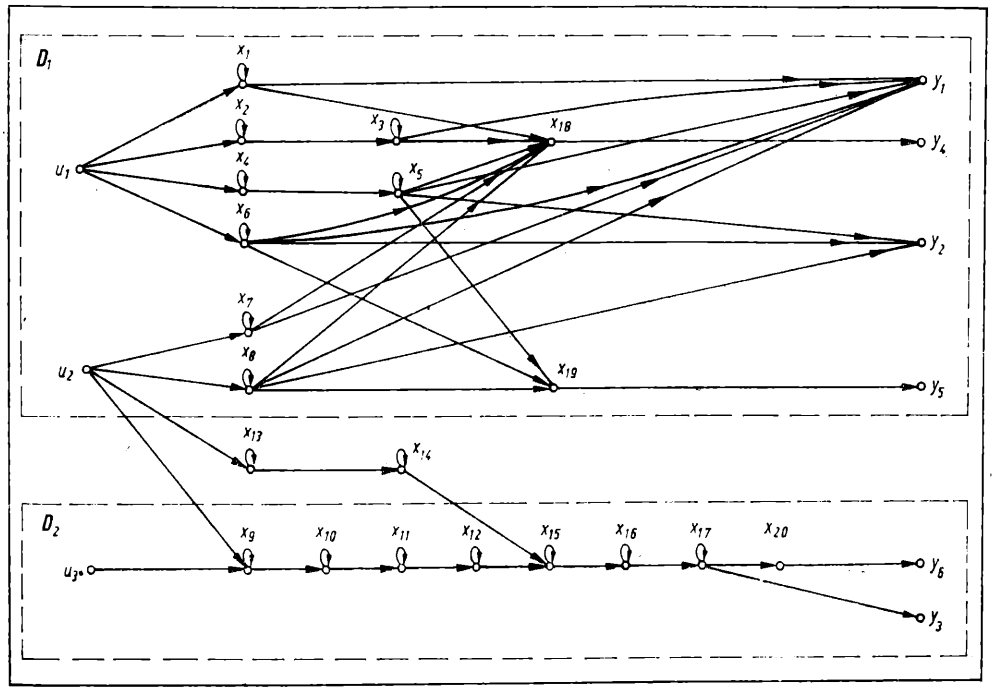



**Bild 2. Strukturgraph nach der Dekomposition**

Hat man vom System jedoch A-priori-Informationen über die Stärke der Kopplungen, ist es möglich, schwache Kopplungen zwischen Ein- und Ausgängen zu vernachlässigen. Im Algorithmus erfolgt das automatisch durch Streichen entsprechender Pfade im Digraphen [8].

In [11] wird gezeigt, daß die Kopplung zwischen dem Eingang $u_3$ (Luftmengenkorrektur) und dem Ausgang $y_2$ (Strangtemperatur) sowohl statisch als auch dynamisch vernachlässigbar klein ist. Unter Vernachlässigung dieser Kopplung läßt sich das System in zwei Teilsysteme zerlegen, die sich wie folgt durch zwei Digraphen darstellen lassen:

$$\boldsymbol{D}_1 = \{\{u_1, u_2\} \vee \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{18}, x_{19}\} \vee \vee \{y_1, y_2, y_4 = x_{18}, y_5 = x_{19}\}, \boldsymbol{Z}_1\},$$

$$\boldsymbol{D}_2 = \{\{u_3\} \vee \{x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{20}\} \vee \vee \{y_3, y_6 = x_{20}\}, \boldsymbol{Z}_2\}.$$

Beide Subgraphen sind E/A-verbunden. Es ist jetzt zu prüfen, ob beide Teilsysteme strukturell steuerbar und beobachtbar sind. Dazu sind die Rangbedingungen (7) und (8) zu prüfen. Man stellt fest, daß beide Teilsysteme den vollen strukturellen Rang haben. Bild 2 zeigt den Strukturgraphen des Systems nach der Zerlegung.

Man stellt jedoch auch fest, daß 2 Zustände, nämlich $x_{13}$ und $x_{14}$, durch keinen der beiden Subgraphen erfaßt werden. Sie sind nach der Zerlegung nicht mehr eingangsverbunden, also auch nicht steuerbar. Da jedoch die dazugehörigen Eigenwerte betragsmäßig sehr groß im Vergleich zu den dominanten Eigenwerten sind [12], kann man die gefundene Struktur ohne große Bedenken für Regelungszwecke nutzen.

Jetzt kann mit bekannten Methoden [13] ein dezentraler PI-Mehrgrößenregler entworfen werden, der die gestellten Güteforderungen selbst unter diesen starken Strukturbeschränkungen erfüllen kann.

## Zusammenfassung

Im Beitrag wurde gezeigt, wie man durch eine strukturelle Analyse eines Mehrgrößensystems den eigentlichen Aufwand für die Berechnung des Reglers reduzieren kann.

Die vorgestellten Algorithmen arbeiten nur mit Booleschen Variablen und Operationen, so daß sich kleine Rechenzeiten und ein geringer Speicherplatzbedarf ergeben. So benötigt die Zerlegung des behandelten Beispiels mit 3 Eingängen, 20 Zuständen und 6 Ausgängen weniger als 2 Minuten Rechenzeit.

Alle Programme sind in einem CACSD-Programmpaket eingebunden [14], das auf einem Rechner des Typs K 1630 implementiert ist (CACSD Computer Aided Control System Design).

Am Beispiel des Industrieofens ist zu sehen, daß man in praktischen Fällen ohne A-priori-Kenntnisse vom System nur selten zu einer Dekomposition des Gesamtsystems gelangt.

Da man im allgemeinen jedoch verbale Aussagen zu den Kopplungsverhältnissen treffen kann, sind die vorgestellten Algorithmen ein effektives Hilfsmittel im Vorfeld der Berechnung strukturbeschränkter Regler.

## Literatur

[1] *Korn, U.*: Zu einigen Konsequenzen der Entwicklung neuer Automatisierungsanlagentechnik mit Mikrorechnern für die Theorie der automatischen Steuerung. Wiss. Zeitschrift der TH Magdeburg 28 (1984) 2, S. 72–80.

[2] *Lunze, J.; Reinschke, K.*: Analyse unvollständig bekannter Regelungssysteme. Teil I. ZKI-Information (1981) 2. Berlin: AdW der DDR.

[3] *Evans, F. J.; Schizas, C.*: Graph theoretic concepts in modern control theory. In: 3. IMA Conference on Control Theory. Hrsg.: *Mashal, J. E.; Colhies, W. D.; Harris, C. J.; Owens, D. H.* London: Academic Press 1981.

[4] *Siljak, D. D.; Pichai, V.; Sezer, M. E.*: Graph theoretic analysis of dynamic systems. University of Santa Clara, California Report DE-AC 037 ET 29138-35, September 1982.

[5] *Reinschke, K.*: Strukturelle Regelungstheorie – ein graphentheoretischer Zugang zur Theorie der automatischen Steuerung. Wiss. Berichte der TH Leipzig (1985) 15, S. 82–102.

[6] *Pichai, V.; Sezer, M. E.; Siljak, D. D.*: A graph theoretic algorithm for hierarchical decomposition of dynamic systems with application to estimation and control. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics SMC-13 (1983) 2, S. 197–207.

[7] *Scholz, A.*: Rechnergestützte Dekomposition von Mehrgrößensystemen. Diplomarbeit D 85/426, TH Magdeburg 1985.

[8] *Korn, U.; Scholz, A.*: Rechnergestützte Dekompositionsmethode als Vorstufe für den Entwurf dezentraler Mehrgrößenregelungen. Wiss. Zeitschrift der TH Magdeburg (1986) 8, S. 78–81.

[9] *Franksen, O. I.; Falster, P.; Evans, F. J.*: Qualitative aspects of large scale systems. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1979.

[10] *Schoch, M.*: Das Erweiterungsprinzip und seine Anwendung. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften 1976.

[11] *Krüger, H.; Jumar, U.*: Untersuchungen zur Regelungsstruktur eines Industrieofens. msr, Berlin 30 (1987) 5, S. 199–203.

[12] *Jumar, U.*: Modellbildung an einem Industrieofen. Bereichsinterne Dokumentation TH Magdeburg, Sektion 9, Wissenschaftsbereich Regelungstechnik und Prozeßsteuerungen, 1986.

[13] *Korn, U.; Wilfert, H.*: Mehrgrößenregelungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.

[14] *Jumar, U.; Scholz, A.*: Dokumentation zur FORTRAN-Programmbibliothek DACUS – Design Aid for Controllers for Uncertain Systems. Bereichsinterne Dokomentation, TH Magdeburg, Sektion 9, Wissenschaftsbereich Regelungstechnik und Prozeßsteuerungen, 1984.

*E.-G. Woschni*

# Konsequenzen einer Erhöhung der Verarbeitungsbreite von Mikrorechnern beim On-line-Einsatz

## 0. Einleitung

Mit dem Übergang vom 4-bit über den 8-bit zum 16-bit und beginnend zum 32-bit-Mikroprozessor treten eine Reihe von Konsequenzen bei der On-line-Verarbeitung auf, wenn die Vorteile der höheren Rechengenauigkeit ausgeschöpft werden sollen. Letztere kommen nämlich nur zum Tragen, wenn neben Quantisierungs- und Rundungsfehlern auch andere Fehler, wie

- Fehler infolge eines nichtidealen Programms
- Fehler infolge Bandbeschneidung zur Erfüllung des Abtasttheorems
- Aliasing-Fehler und Fehler infolge der begrenzten Zahl der Stützwerte (Abtastwerte),

entsprechend verringert werden.
Im Beitrag stehen diese verschiedenen Fehlerarten unter besonderer Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Verflechtung im Mittelpunkt der Betrachtungen.
Die in der Größenordnung von $1:10:10^2:(10^4 \ldots 10^5)$ steigenden Rechengenauigkeiten beim Übergang von 4-, 8-, 16- zu 32-bit Verarbeitungsbreite bringen, wie im einzelnen gezeigt werden wird, große Anforderungen an die zur Reduzierung der oben angeführten Fehlerarten zu erfüllenden Voraussetzungen, insbesondere eine wesentliche Erhöhung der Abtastfrequenz, mit sich.

## 1. Fehler infolge eines nichtidealen Verarbeitungsprogramms

Bekanntlich stellen reale Verarbeitungsprogramme $Op_{\mathrm{real}}$ stets Näherungen an das ideale Programm $Op_{\mathrm{id}}$ dar. Nach den Methoden der Systemtheorie [1] und [2] erhält man bei linearen Programmen mit

$$\left.\begin{aligned} G_{\mathrm{id}}(j\omega) &\triangleq F\{Op_{\mathrm{id}}\}\,, \\ G_{\mathrm{real}}(j\omega) &\triangleq f\{Op_{\mathrm{real}}\} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

für den mittleren quadratischen Fehler infolge eines nichtidealen linearen Verarbeitungsprogramms [1] mit der spektralen Leistungsdichte des Signals $S_{xx}(\omega)$

$$\overline{\varepsilon^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega)\,|G_{\mathrm{id}}(j\omega) - G_{\mathrm{real}}(j\omega)|^2\,\mathrm{d}\omega\,. \tag{2}$$

Als praktisch wichtiges Beispiel sei ein Integrationsprogramm angenommen. Für die Rechteckapproximation erhält man [3]

$$G_{\mathrm{real}}(j\omega) = T_{\mathrm{A}}\,\frac{1}{1 - \mathrm{e}^{-j\omega T_{\mathrm{A}}}} \tag{3a}$$

und für die Trapezapproximation

$$G_{\mathrm{real}}(j\omega) = \frac{T_{\mathrm{A}}}{2}\,\frac{1 + \mathrm{e}^{-j\omega T_{\mathrm{A}}}}{1 - \mathrm{e}^{-j\omega T_{\mathrm{A}}}}\,, \tag{3b}$$

d. h., wie in [3] gezeigt, für letztere im Gegensatz zur Rechteckapproximation nur einen Amplituden- und keinen Phasenfehler. Entsprechend Bild 1 kann damit eine Verminderung des Fehlers um etwa 1 Größenordnung durch Wahl des besseren Algorithmus erreicht werden. Dies muß allerdings durch eine Vergrößerung der Rechenzeit um etwa den Faktor 2 erkauft werden [3].

## 2. Fehler infolge Anti-Aliasing-Filterung

Zur Erfüllung des Abtasttheorems ist durch Tiefpaßfilterung (sogenannte Anti-Aliasing-Filterung) ein auf $\omega_{\mathrm{g}} = \omega_{\mathrm{A}}/2$ bandbegrenztes Eingangssignal herzustellen. Das Abschneiden der Spektralfrequenzen für $\omega > \omega_{\mathrm{g}}$ ergibt entsprechend (2) einen mittleren quadratischen Fehler

$$\overline{\varepsilon^2} = 2\int_{\omega_{\mathrm{g}}}^{\infty} S_{xx}(\omega)\,\mathrm{d}\omega\,. \tag{4}$$

Nimmt man, in guter Übereinstimmung mit der Praxis, ein oberhalb der Frequenz $\omega_0$ abfallendes Spektrum nach Bild 2

$$S_{xx}(\omega) = \frac{S_{xx_0}}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \tag{5a}$$

an, so erhält man für den mittleren quadratischen Fehler in Abhängigkeit von der Grenzfrequenz $\omega_{\mathrm{g}} = \omega_{\mathrm{A}}/2$

$$\overline{\varepsilon^2} = 2S_{xx_0}\omega_0\left[\frac{\pi}{2} - \arctan\frac{\omega_{\mathrm{A}}}{2\omega_0}\right]. \tag{5b}$$

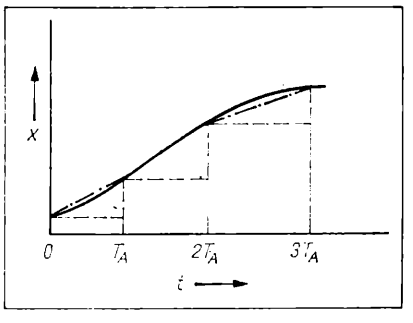



**Bild 1. Rechteck- und Trapezapproximation für die Integration**

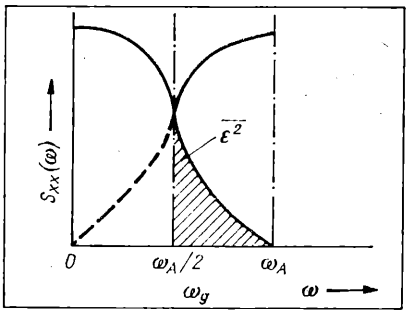



**Bild 2. Zur Berechnung des Fehlers nach den Abschnitten 2. und 3.**

Für $\omega_{\mathrm{A}}/2\omega_0 > 1$ erhält man mit der Reihenentwicklung von $\arctan x \approx \frac{\pi}{2} - \frac{1}{x}$ das Ergebnis

$$\overline{\varepsilon^2} = S_{xx_0}/\omega_{\mathrm{A}}\,. \tag{5c}$$

Eine Verringerung des Fehlers um eine Größenordnung ist daher durch eine Vergrößerung der Abtastfrequenz um ebenfalls eine Größenordnung zu erreichen.

## 3. Aliasing-Fehler

Aliasing-Fehler müssen insbesondere in der Meßtechnik zunehmend berücksichtigt werden, da bei den modernen Sensoren mit direkt-digitalem Ausgang wegen der direkten Prozeßkopplung meist eine vorherige Tiefpaßfilterung entsprechend Abschnitt 2. nicht durchführbar ist. Nach [4] und Bild 2 kann der Aliasing-Fehler zum Doppelten des Fehlers infolge Bandbegrenzung abgeschätzt werden, d. h., entsprechend (4) entsteht ein Fehler von

$$\overline{\varepsilon^2} = 4\int_{\omega_{\mathrm{g}}}^{\infty} S_{xx}(\omega)\,\mathrm{d}\omega\,. \tag{6}$$

Damit sind die Ergebnisse von Abschnitt 2. einschließlich der Beziehung (5c) und der im Anschluß angegebenen Schlußfolgerungen auch hier gültig.

---

Prof. Dr.-Ing. habil Dr.-Ing. E. h. *Eugen-Georg Woschni* studierte von 1947 bis 1951 an der TH Dresden. Danach wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent an der TH Dresden. 1953 Promotion A, 1956 Habilitation. Seit 1957 Professor an der TH bzw. TU Karl-Marx-Stadt. Vorstandsmitglied der WGMA.

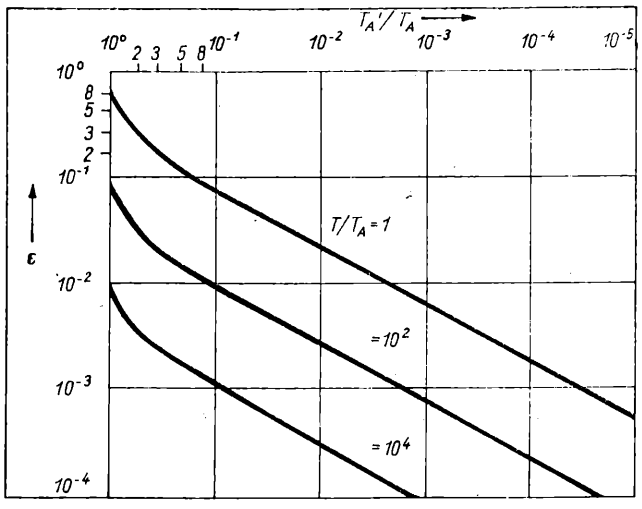



**Bild 3. Abtastfehler in Abhängigkeit von der erforderlichen Abtastzeit $T_A'/T_A$ für sinusförmige Eingangssignale [6]**

## 4. Fehler infolge der begrenzten Anzahl der Abtastwerte

Nach dem Abtasttheorem ist neben der Bandbregenzung des Signals eine unendlich große Anzahl von Abtastwerten zur fehlerfreien Wiederherstellung des Signalverlaufes nach Abtastung erforderlich [5]. Beide Forderungen sind bekanntlich nicht miteinander vereinbar.

Eine Begrenzung der Anzahl der Abtastwerte, d. h. eine Beschneidung des Zeitabschnittes auf die Beobachtungszeit $T$, ist grundsätzlich unvermeidlich, obwohl diese Zeit bei On-line-Verarbeitung im Gegensatz zur Off-line-Technik naturgemäß groß ist. Sie führt zu einem Fehler $\varepsilon$, der nach den Bildern 3 und 4 von der gegenüber der Abtastzeit $T_A$ nach dem Abtasttheorem verkleinerten Abtastzeit $T_A'$ abhängt [6].

Dem für die praktischen Belange eines Frequenzgemisches nahe kommenden Fall nach Bild 4 entnimmt man, daß eine Verringerung dieses Fehleranteils um eine Größenordnung bei den in der Praxis auftretenden Fällen mit $T/T_A > 10$ durch eine um den Faktor 3 ... 10 verkürzte Abtastzeit $T_A'$ bzw. erhöhte Abtastfrequenz $\omega_A'$ erreicht wird und erst bei hohen Forderungen bezüglich des Fehlers ($\varepsilon < 10^{-4}$) durch eine um 2 Größenordnungen verkürzte Abtastzeit $T_A'$ bzw. erhöhte Abtastfrequenz $\omega_A'$ erkauft werden muß.

Damit erhält man auch in diesem Fall für den quadratischen Fehler $\overline{\varepsilon^2}$ bei hohen Forderungen dieselben Ergebnisse wie in den Abschnitten 2. und 3.

### Schlußfolgerungen

Die enorme Reduzierung der numerischen Fehler beim Übergang zu größeren Verarbeitungsbreiten stellt beim On-line-Einsatz wegen der dort oft bestehenden Ansprüche an das dynamische Verhalten erhebliche Anforderungen hinsichtlich der Reduzierung der anderen Fehlerarten. Während die Reduzierung der Fehler infolge eines nichtidealen Verarbeitungsalgorithmus mit einer relativ geringen Erhöhung der Rechenzeit realisiert werden kann, verlangen insbesondere die Reduzierung der Aliasing- und Cut-off-Fehler sowie der Fehler infolge der begrenzten Anzahl der Abtastwerte eine erhebliche Verkürzung der Abtastzeit bzw. Erhöhung der Abtastfrequenz. Damit zeigt ein Vergleich dieser Fehlerarten, daß eine Reduzierung der Fehler um eine Größenordnung durch größere Verarbeitungsbreiten des Mikroprozessors eine Erhöhung der Abtastfrequenz um etwa ebenfalls eine Größenordnung erfordert, um die ande-

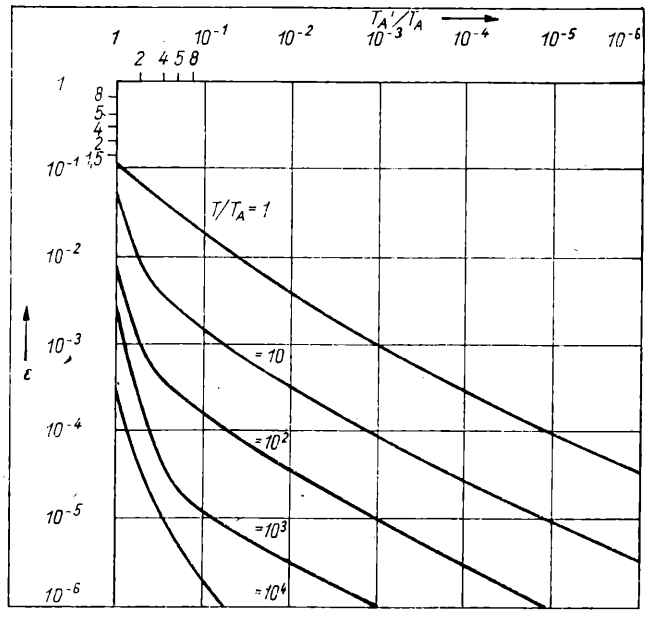



**Bild 4. Abtastfehler in Abhängigkeit von der erforderlichen Abtastzeit $T_A'/T_A$ für stochastische Eingangssignale mit weißer Rauschstruktur [6]**

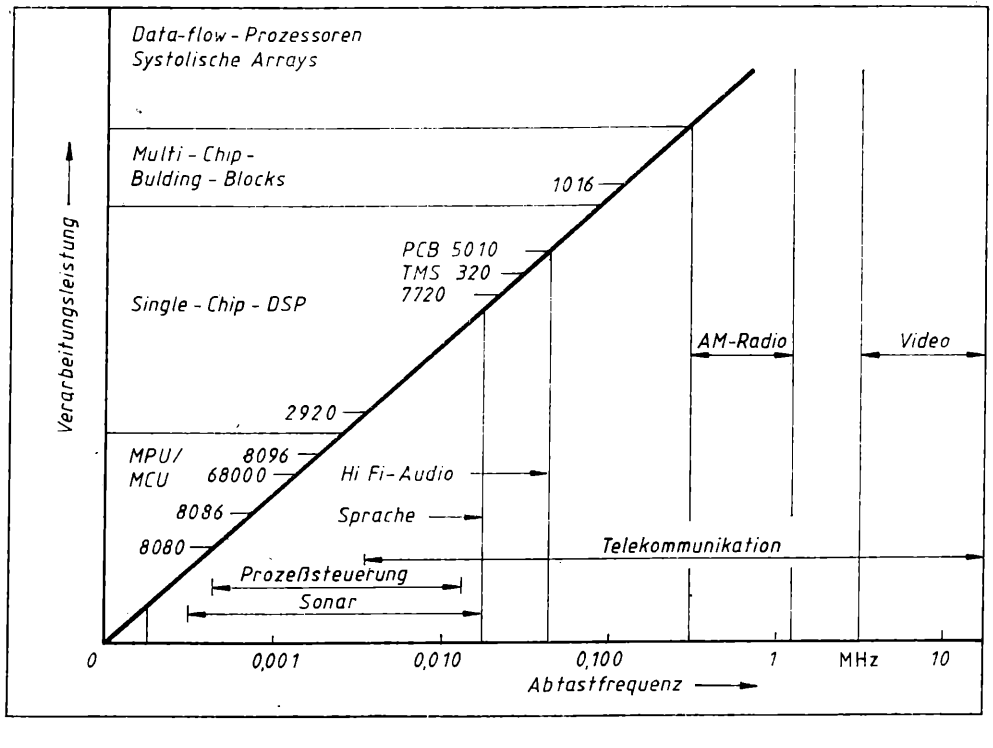



**Bild 5. Verarbeitungsleistungen von Mikrorechnern und Signalprozessoren nach [7]**

ren Fehler ebenfalls im gleichen Maß zu reduzieren. Dies setzt gleichzeitig kürzere Rechenzeiten voraus, was der Forderung nach Abschnitt 1. zuwiderläuft.

Schätzt man den heutigen Stand und die prognostizierte Weiterentwicklung ein, wie sie im Bild 5 dargestellt sind, so zeigt sich, daß seit Einführung des ersten Signalprozessors INTEL 2920 eine Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit um etwa eine Größenordnung erfolgt ist. Damit sind die Grenzfrequenzen vom kHz- in das 10 kHz-Gebiet angestiegen. Erst eine Erhöhung um eine weitere Größenordnung, wie sie von Multi-Chip-Signalprozessoren zu erwarten ist, wird das Gebiet um 100 kHz erschließen.

Unter Berücksichtigung der oben angeführten Ergebnisse stellt daher für dynamische Prozesse mit hoher erforderlicher Grenzfrequenz oft der Einsatz von Prozessoren geringerer Verarbeitungsbreite heute noch eine günstigere Lösung dar, zumal dies auch für die AD-Wandlung gilt. Damit ergibt sich derzeit eine ähnliche Situation wie mit dem Polaritätskorrelator bei den Korrelationsverfahren.

Für Diskussionen zum Thema ist der Autor den Professoren *H. Leopold*, Graz, *G. Meyer*, Karl-Marx-Stadt, und *W. Schwarz*, Dresden, dankbar.

**Literatur**

[1] *Woschni, E.-G.:* Informationstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1988.
[2] *Schlitt, H.:* Stochastische Vorgänge in linearen und nichtlinearen Regelkreisen. Berlin: VEB Verlag Technik 1968.
[3] *Woschni, E.-G.:* Fehler bei digitalen Meßverfahren — ein Überblick. 30. Int. Wissenschaftliches Kolloquium TH Ilmenau 1985. Vortragsreihe „Prozeßmeß- und Sensortechnik", S. 111—113.
[5] *Churkin, J. I.; Jakowlew, C. P.; Wunsch, G.:* Theorie und Anwendung der Signalabtastung. Berlin: VEB Verlag Technik 1966.
[6] *Herold, H.; Woschni, E.-G.:* Fehler bei der Abtastung von Signalen endlicher Dauer. msr, Berlin 28 (1985) 11, S. 485—489 und 509.
[7] *Hinrichsmeyer, H. J.:* Signalverarbeitungschips mit Familienkonzept. Elektronik 35 (1986) 12, S. 48—52.

msr 8705

*W. Barth; K.-J. Müller; F. Reichel; G. Zeun*

# Robotersteuerung IRS 713 (Teil 1)

## 0. Einleitung

Mit der Steuerung IRS 713 stellt der VEB Numerik „Karl Marx" seine dritte serienmäßige Robotersteuerung für Beschickungsroboter zur Verfügung. Wie die Vorgängermodelle IRS 600 und IRS 651 wurde diese Lösung im Rahmen einer Gemeinschaftsentwicklung mit dem Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaues geschaffen. Basis dieser Steuerung, die in ihrem hardware und softwaremäßigen Leistungsvermögen an die heutigen, vorwiegend elektrisch angetriebenen Roboter für Handlingaufgaben angepaßt wurde, ist das U880-Mikrorechnersystem.

Zu Beginn der Entwicklung der Robotertechnik in der DDR mußte verstärkt auf hydraulische Antriebe zurückgegriffen werden. Kleine Gleichstromantriebe für den Aufbau von Roboterkonstruktionen waren noch nicht vorhanden. Mit der Produktionseinführung der roboterspezifischen Antriebe RSM 10 (1,3 Nm) und RSM 60 (3,5 Nm) in Verbindung mit einpulsiger Stellertechnik geringen Bauvolumens (TDR 100) änderte sich hier das Bild entscheidend. Es werden nun vorwiegend hochuntersetzende Getriebe (Harmonic-Drive) in Verbindung mit elektrischen Antrieben angewendet, und es entstand eine Anzahl von modernen Roboterkonstruktionen. Diese Entwicklungstendenzen sowie der Trend zur Erhöhung der Rechenleistung, des Bedienkomforts und der Intelligenz, u. a. durch Sensorsignalverarbeitung, haben wesentlich die Konzeption der IRS 713 geprägt.

Eine bedeutende sowohl nationale als auch internationale Entwicklungsrichtung der Robotertechnik zeichnet sich im Zusammenhang mit der flexiblen Automatisierung der Fertigung ab. Die Handlingroboter stellen dabei wichtige Module des Bearbeitungs- und Stoffflußsystems dar, die dem Einsatz in Fertigungszellen, Fertigungssystemen und Fertigungsstraßen angepaßt sein müssen. Es resultieren daraus die Forderungen:

- flexible und schnell umrüstbare Robotertechnik
- hohes Funktionsvermögen bei bedienarmer Handhabung
- hohe Kompatibilität
- leistungsfähige Schnittstellen zum Prozeß und zum übergeordneten Leitrechner (DNC-Kopplung)
- umfangreiches Diagnosesystem
- hohe Zuverlässigkeit.

Die vielseitigen technischen Anforderungen wurden in den Eckparametern der Steuerungen IRS 600, 651 und 713 weitestgehend berücksichtigt. Wie die Gegenüberstellung in Tafel 1 zeigt, erreicht die IRS 713 gegenüber den Vorgängermodellen wesentlich gesteigerte Leistungsparameter. Besonders auffällig ist die Leistungssteigerung der IRS 713 gegenüber der IRS 651 beim Einsatz in flexiblen Fertigungszellen, wie der

- Drehzelle DFS 2/2 (VEB Großdrehmaschinenbau „8. Mai")
- Fräszelle FC 400 (VEB WEMA Auerbach),

wo neben einer CNC H 645 bzw. CNC 600/3 und einer IRS 651 noch zusätzlich eine speicherprogrammierbare Steuerung PC 601 erforderlich war, um die Bearbeitungsmaschine (DFS 2/2,

**Tafel 1. Gegenüberstellung IRS 600/651/713**

| | IRS 600 | IRS 651 | IRS 713 |
|---|---|---|---|
| Roboterantriebs- und Stellertechnik | hydraulische Schubkolben/ Servoventile | Gleichstrommotoren/Thyristorsteller | |
| mögliche Anzahl der NC-Achsen | 3 | 6 | 6 |
| Anzahl der U880-Rechner | 1 | 2 Leitrechner, Slave für Lageregelung | 4 Leitrechner, Slave für Lageregelung, Slave für SPS, Slave für Tableau |
| binäre Ein-/Ausgänge | 144 Ein-/ 112 Ausgänge | 96 Ein-/ 96 Ausgänge | 160 Ein-/ 128 Ausgänge |
| Anschlußsteuerungen | Lochbandleser/-stanzer | Kassettenmagnetband, DNC (IFSS) | Kassettenmagnetband, DNC (IFSS), Lochbandleser/ -stanzer |
| benötigte Zusatzgeräte | Bedientableau | Bedientableau Kassettengerät Terminal K 8911 | Bedientableau Kassettengerät |
| Sensorkopplung | — | — | binäre Sensoren |

Dipl.-Ing. *Werner Barth* (46) studierte von 1960 bis 1965 an der TH Karl-Marx-Stadt in der Fachrichtung Regelungstechnik/Maschinenbau. Bis 1969 Konstrukteur im VEB Spinnereimaschinenbau. Seit 1969 Mitarbeiter F/E im Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus Karl-Marx-Stadt.

Dipl.-Ing. *Klaus-Jürgen Müller* (32) studierte von 1975 bis 1979 Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik mit der Spezialisierung Prozeßdatenverarbeitung an der TH Karl-Marx-Stadt. Anschließend Mitarbeiter F/E im Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus Karl-Marx-Stadt.

Dipl.-Ing. *Friedemann Reichel* (43) studierte nach einer Facharbeiterausbildung als Werkzeugmacher von 1964 bis 1969 an der TH Karl-Marx-Stadt in der Fachrichtung Konstruktion von Werkzeugmaschinen. Seit 1969 Mitarbeiter F/E am Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus Karl-Marx-Stadt.

Dipl.Ing. *Gerd Zeun* (44) studierte von 1963 bis 1969 an der Sektion Technische Kybernetik der TH Ilmenau in der Fachrichtung Biomedizinische Technik. Von 1969 bis 1982 als Entwickler, Gruppenleiter, Abteilungsleiter F/E und Fachbereichsleiter Wissenschaft und Technik im VEB Robotron Meßelektronik Dresden, Betriebsteil Pochau tätig. Anschließend Fachabteilungsleiter Industrieroboter- und Transportgerätesteuerungen im Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaus Karl-Marx-Stadt.

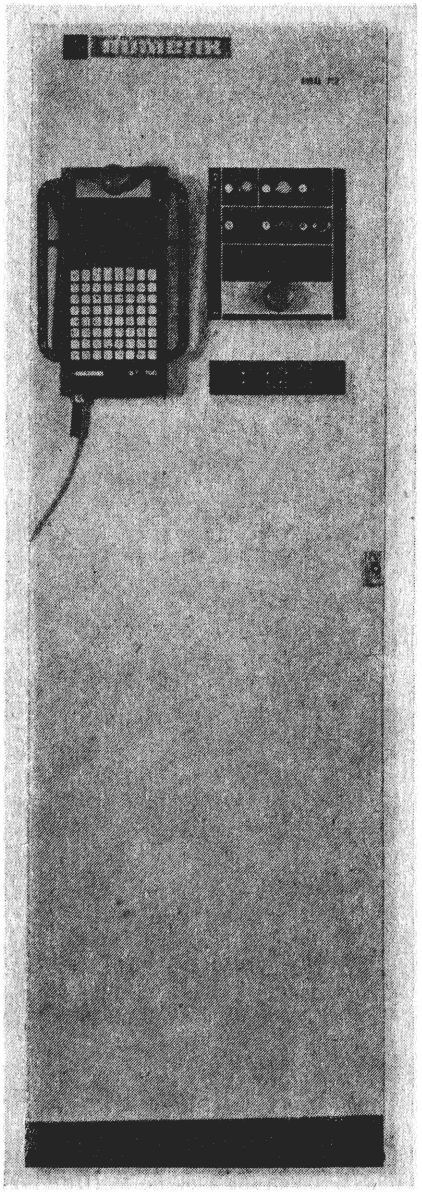


Bild 1. Industrieroboter-steuerung IRS 713 — Vorderansicht

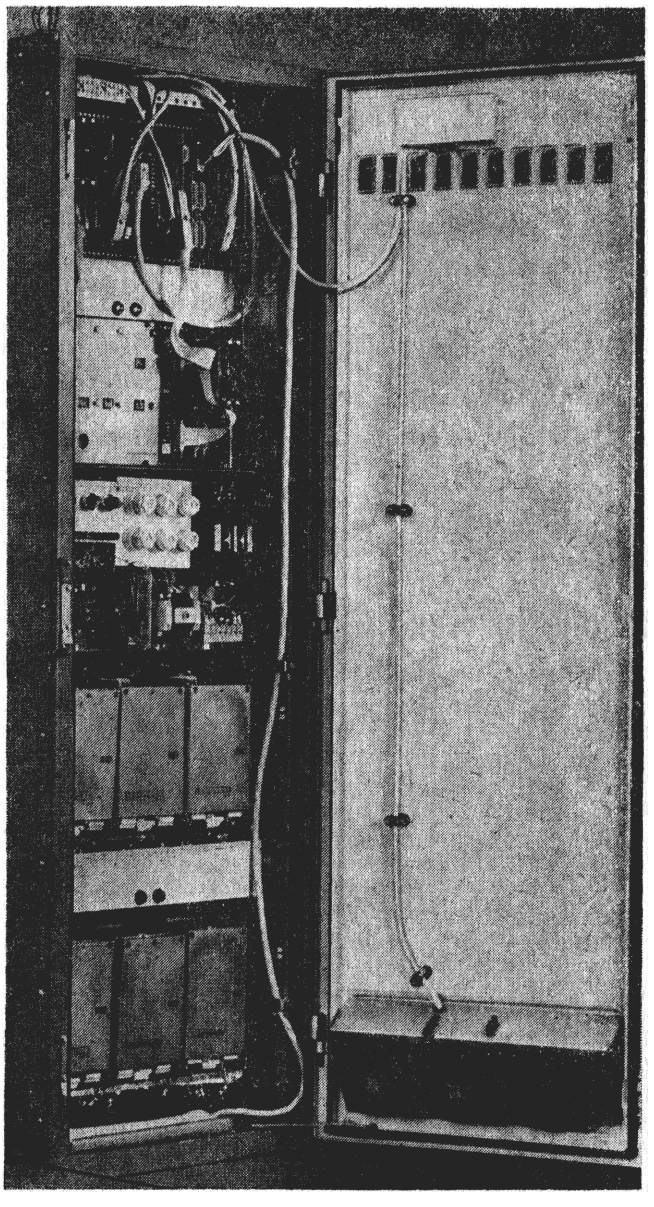


Bild 2. Industrieroboter-steuerung IRS 713 — Innenansicht mit Wärmetauscher

FC 400), den Portalroboter IR 2 P und die Peripherie zu steuern. Beim Einsatz der IRS 713 entfällt die Steuerung PC 601.
Aufgrund der raschen Entwicklung der flexiblen Fertigungssysteme in Richtung automatisierter Betrieb werden an die Robotersteuerungstechnik immer vielseitigere Anforderungen gestellt, die sich auf der Basis der höher integrierten und leistungsfähigeren mikroelektronischen Schaltkreise ständig weiterentwickelt. So ist die vorgestellte IRS 713 als wichtige Etappe aber nicht als Abschluß auf dem Gebiet der Industrieroboter-Steuerungstechnik in der DDR zu bewerten.

## 1. Konstruktiver Aufbau

In Konstruktion und im Baugruppeneinsatz wurden bei der IRS 713 viele Vereinheitlichungen mit der im VEB Numerik in Entwicklung befindlichen Gelenkrobotersteuerung IRS 711 vorgenommen.
Die Steuerung (Bilder 1 und 2) vereinigt in einem EGS-Gehäuse der Abmessungen 600 × 600 × 1800 mm³ die Hauptbaugruppen:

- Logikteil (2 EGS-Kassetten, 480 mm breit) mit Kartenbaugruppen im Format 170 × 215 mm²
- Stellerteil mit 6 Thyristorstellern vom Typ TDR 100.

In zusätzlichen Baugruppen sind Leistungsschaltelemente, Trafos, Gleichrichterteil für Rohstromversorgung, eine Widerstandskombination zur Schnellbremsung der Antriebe sowie eine Relaisbaugruppe im Türinnenteil untergebracht.

Die Bedieneinheit BT 700 (Bild 3) ist außen ansteckbar. Weitere Steckverbinder sind für das Kassettenmagnetbandgerät BG 650 sowie für die Leser FS 330, FS 100 und die Stanzer DT 105S, Daro 1215 oder Facit 4070 vorgesehen.
Die entstehende Verlustwärme wird durch 4 Lüftermotoren im Schrankinneren verwirbelt und durch 5 weitere Lüfter im Wärmetauscher, der konstruktiv mit einer Tür vereinigt ist, aus dem Schrankinneren an die Umgebungsluft abgeführt.
Die Steuerung kann entsprechend den Anwenderbedürfnissen bezüglich der Anzahl der Steller und des Inhaltes des Logikteiles kundenspezifisch variiert werden. Genaue Angaben sind [2] zu entnehmen.
Unbedingt erforderlich ist stets das Bedientableau BT 700, da Inbetriebnahme, Generierung, Programmerstellung, Bedienung und Diagnosebetrieb ausschließlich hiermit abgewickelt werden. Das Kassettengerät BG 650 als Beistellgerät basiert auf der Robotron-Entwicklung K 5200. Es sollte immer dann eingesetzt werden, wenn Programme archiviert werden, größere Programmbibliotheken anzulegen oder nachladbare Diagnose erforderlich sind.

## 2. Logische Struktur

In der Konzeption der IRS 713 wird ein K-1520-Buskonzept realisiert, bei dem alle Funktionselemente am Leitrechnerbus angeordnet wurden. Die Slaverechner für Lageregelung und SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) sind als speicherkoppelbare Recheneinheiten (SRE) über gemeinsam von Leitrechner und Slave adressierbare Speicherbereiche datenmäßig verbun-

den. Der Tableaurechner hingegen wird seriell über eine IFSS-Schnittstelle angeschlossen.
Während als Leitrechner die ZRE K 2521 Verwendung fand, sind die Slaverechner SRE 1 und SRE 2 sowie der Tableaurechner speziell auf die Aufgabe zugeschnittene Entwicklungen des VEB Numerik „Karl Marx". Für SRE 1 und SRE 2 wurde jeweils der gleiche Typ verwendet.
Die Gesamtstruktur zeigt das Blockschaltbild im Bild 4. Die Steuerung besteht aus maximal 29 Kartenbaugruppen (KBG). Davon befinden sich 23 KBG in der Logikkassette. Zum Betrieb der restlichen 6 KBG wurde der Bus über einen Frontsteckverbinder der SRE 2 einer Treiberbaugruppe zugeführt und über Verbindungskabel und eine weitere Bustreiberbaugruppe auf die im rechten Teil der Stromversorgungskassette befindlichen Bussteckplätze geführt (siehe Bild 5).
Beim Speicheraufbau wird mit den beiden Typen EPROM U 555 (1 Kbyte) und U 556 (2 Kbyte) gearbeitet, während als RAM vorwiegend der CMOS-RAM mit 125 byte/Chip eingesetzt wird. Es wurde angestrebt, die Speichersubstanz funktionsnah am Rechner oder der jeweiligen Baugruppe zu installieren. So befinden sich auf

| | |
|---|---|
| – ZRE K 2521 | 3 Kbyte EPROM, 1 Kbyte RAM |
| – Slaves SRE1 und SRE2 | je 4 Kbyte EPROM, 1 Kbyte RAM |
| – Slave Tableaurechner | 8 Kbyte EPROM, 1 Kbyte RAM |
| – KBG DNC | 4 Kbyte EPROM |
| – KBG Bustreiber | 7 Kbyte EPROM. |

Das Softwarevolumen der Steuerung erfordert jedoch zudem den Einsatz weiterer kompakter Speichermodule, die mit 2 × K 3820 (je 16 Kbyte EPROM) und 5 × K 3521 (je 4 Kbyte CMOS-RAM) realisiert wurden.

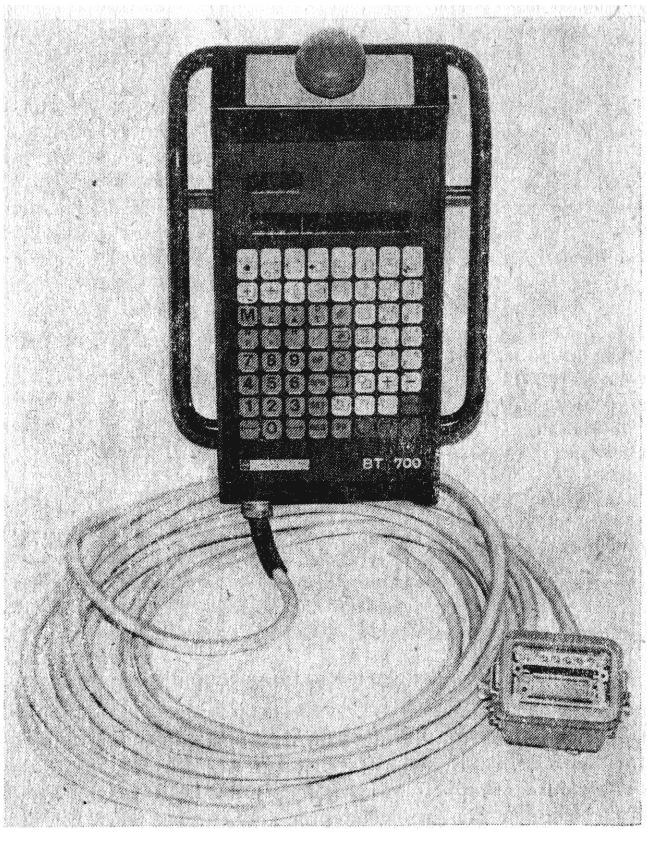



Bild 3. Bedientableau BT 700

### 3. Logiksteuerung

Die Logiksteuerung wird durch 4 Teilkomponenten gebildet:

- ablauforientierte Assemblerlogik, vorwiegend für den IR-Hersteller zur Realisierung von IR-Grundfunktionen auf EPROM
- freiprogrammierbare Logik (SPS), ablauforientiert
  Funktionen:
  Setzen, Rücksetzen, konjunktives und disjunktives Verknüpfen wahrer und negierter Variablen, Zähler, Zeitglieder, bedingte und unbedingte Sprünge
- generierbare Einfachlogik; schnelle Reaktionszeiten von maximal 12,5 ms
- Logikkomponente der NC-Ablaufsteuerung.

Synchronisation und Kommunikation innerhalb der Logiksteuerung erfolgen über ein slave- und leitrechnerseitig vorhandenes Abbild der Ein- und Ausgänge und Merker (Exxy, Axxy, Mxxy; xx Kanalnummer, y Bitnummer).
Die vier Logikkomponenten laufen zeitlich quasiparallel ab; Assemblerlogik und SPS mit einer Zykluszeit von $n \cdot 12{,}5$ ms; $n = 1, 2, 3, 4$ ist abhängig vom Umfang der implementierten Logik und unterliegt einer ständigen automatischen Minimierung und Kontrolle. Die Einfachlogik ermöglicht schnellstmögliche eingangsabhängige Schalthandlungen (z. B. Abschalten eines getakteten Teilespeichers in der Übernahmeposition mit minimalem Überlaufweg).

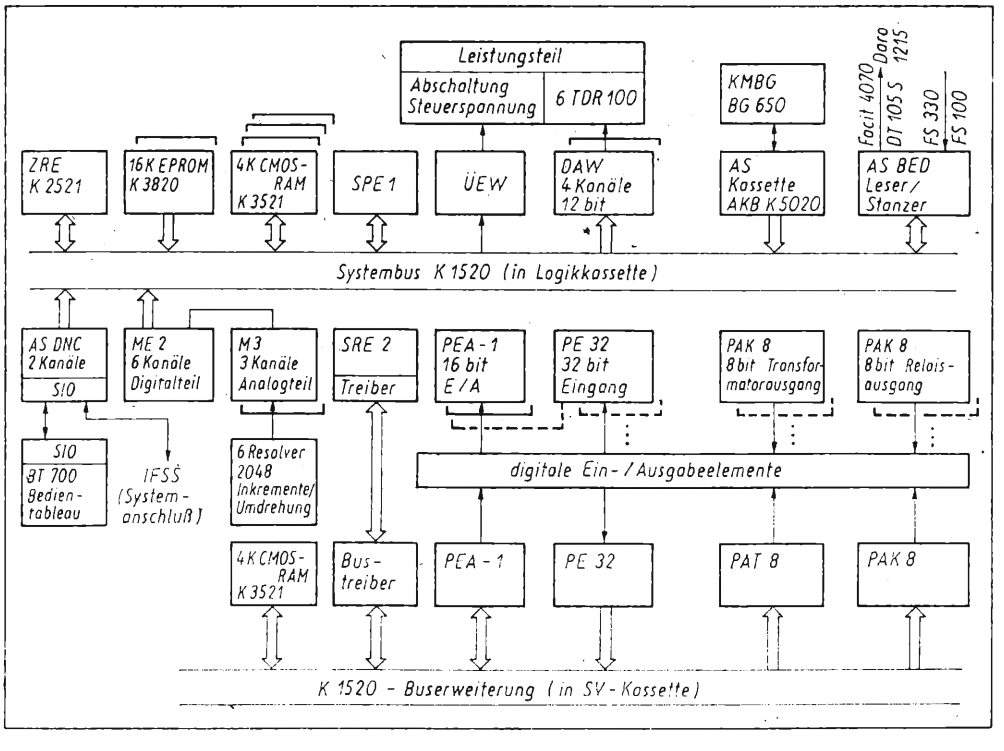



Bild 4. Blockschaltbild IRS 713

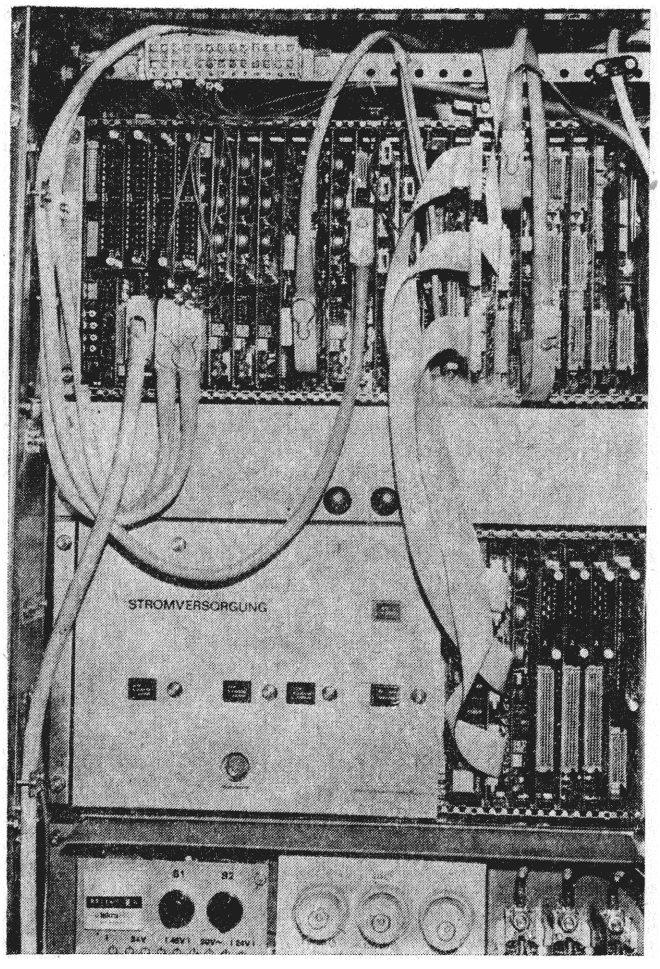



Bild 5. Steuerung

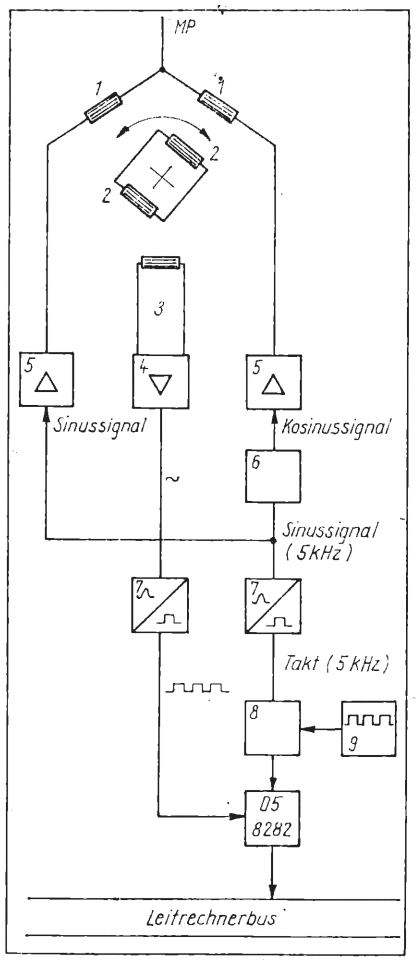



Bild 6. Meßsystemelektronik der IRS 713
*1* Statorwicklung; *2* Rotorwicklung; *3* Meßsignal; *4* Filterverstärker; *5* Treiberverstärker; *6* Phasenschieber; *7* Impulsformer; *8* Frequenzteiler/Zähler; *9* Taktgenerator

Mit den binären Signalen der Eingabe-/Ausgabeelemente werden folgende Funktionen realisiert:

- Referenz- und Endlagenmeldungen der Roboterachsen
- Verriegelungsbedingungen und Ansteuersignale der Roboter-(NC)-Programme
- Eingabe-/Ausgabesignale der internen SPS-Steuerwerke, mit denen auch zeitparallel zum Roboterhauptprogramm ablaufende technologische Prozesse gesteuert werden können. Die Programmierung dieser Vorgänge kann in einer für IRS 713 speziell angepaßten SPS-Sprache oder in Sonderfällen in Assemblersprache erfolgen.
- Die Steuerung besitzt zusätzlich Eingabekanäle für in der Betriebssoftware vororganisierte Sonderfunktionen, bei deren Verwendung die Bedeutung der einzelnen Signale durch Generierungsmaßnahmen festgelegt werden kann.
  Hierzu zählen:
  . Behandlung schneller Eingänge
  Bei diesem Kanal werden Reaktionszeiten bei Änderung binärer Eingangssignale von kleiner 10 ms erreicht.
  .. Fehlerkanal
  Die Signaländerung der hier angelegten Eingangssignale bewirkt Anzeige- und Abschaltfunktionen.
  . Sensorkanal
  Binäre Sensorsignale lösen Geschwindigkeitsreduzierung, Stop oder Satzende aus.

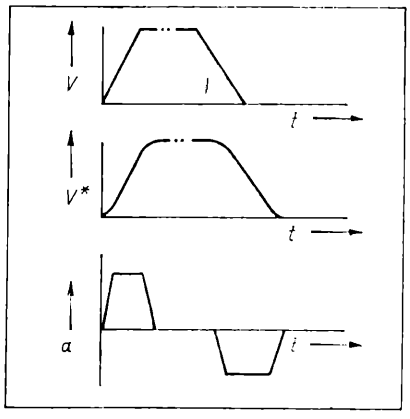
**Tafel 2. E/A-Kassettenbaugruppen der IRS 713**

| Typ | Datenrichtung | Bitanzahl | Spannung | Strom/Bit | Bemerkung |
|---|---|---|---|---|---|
| PE32 | Eingabe | 32 | 12 ... 24 V | 15 mA | kontaktlos |
| PEA-1 | Ein- und Ausgabe | 16 Eingänge 16 Ausgänge | 12 ... 24 V | Eingabe: 15 mA Ausgabe: 300 mA | kontaktlos |
| PAT8 | Ausgabe | 8 | 12 ... 24 V | 2 A | kontaktlos |
| PAK8 | Ausgabe | 8 | maximal 48 V | 70 VA Kontaktleistung | Leiterplattenrelais |

Die Kartenbaugruppen für Ein-/Ausgabe haben alle eine K-1520-kompatible Busschnittstelle, bei der Adreß- und Datensignale optoentkoppelt werden. Jede KBG besitzt einen Frontsteckverbinder für Anzeigeadapter zur Anzeige jedes Bit über Lumineszenzdioden sowie einen 39poligen Steckverbinder für Prozeßanschluß. Es sind in der maximalen Ausbaustufe 9 KBG-Typen vorgesehen (Tafel 2).
Als Grundausrüstung jeder IRS und für den Anschluß der robotertypischen Festsignale, wie Endlagen- und Referenzmeldungen, sind bei jeder Projektierungsvariante je eine KBG PEA-1 und PE 32 vorgesehen.

## 4. Lageregelungsteil

Die Lageregelung erfolgt simultan für 6 NC-Achsen, rechnergeführt mit Slave SRE 1. Die Baugruppen für Meßsystemanschluß und D/A-Wandler in Verbindung mit dem Thyristorsteller wirken als Geradeauslogik. Sie sind die Meß- und Stellglieder der rechnergeführten Lageregelkreise. Den Positionsregelkreisen sind als Hardwarebaugruppen jeweils mit Geschwindigkeitsgebern (Tachogenerator) arbeitende Geschwindigkeitsregelkreise nachgeschaltet. Der Slave (SRE 2) kann nicht auf seine Peripherie (Meßsystem und D/A-Wandler) zugreifen, sondern wird datenmäßig vom Leitrechner versorgt [3].
Als Positionsmeßtechnik sind 2polige Resolver eingesetzt. Über die KBG M3 sind jeweils 3 Meßsysteme anzuschließen. Die Busaufschaltung und der Taktgenerator von 10,240 MHz befinden sich auf der KBG ME2, die im getakteten Betrieb alle 6 Meßsysteme an den Leitrechnerbus ankoppelt. Die Arbeitsweise der Meßsystemelektronik folgt aus Bild 6.
Der quarzstabilisierte Takt von 10,240 MHz wird einer Frequenzteiler-/Zählerstufe zugeführt, die mit einer Frequenz von 5 kHz umlaufend von 0 ... 2047 durchzählt. Zur Speisung der Statorwicklungen der Resolver wird das digitale 5-kHz-Signal




◀ **Bild 7. Sollwertglättung**

*V* Geschwindigkeit vor der Sollwertglättung; *V** Geschwindigkeit nach der Sollwertglättung; *a* Beschleunigung

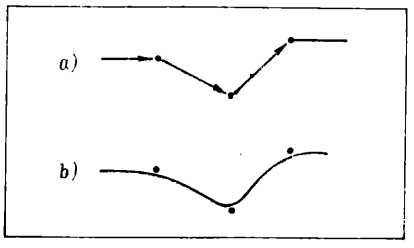



**Bild 8. Feinpunkt und Grobpunktfunktion**

Verfahrbewegung: a) bei Funktion Feinpunkt; b) bei Funktion Grobpunkt

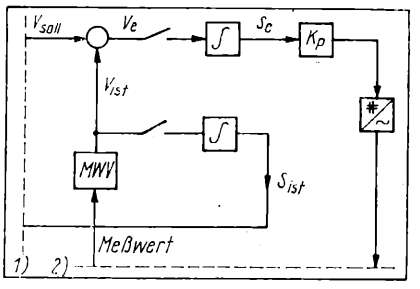



**Bild 9. Lageregelkreis**

1) Schnittstelle Betriebssystem; 2) Schnittstelle Prozeß

in eine Sinuswelle umgewandelt, die anschließend um 90° phasenverschoben wird. Sinus- und Kosinuswelle werden getrieben und den beiden Statorwicklungen der Resolver zugeführt. Der Meßwert wird dual verschlüsselt weiterbehandelt und benötigt somit im Rechner eine Datenbreite von 11 bit. Von der Meßsystemelektronik wird nur die jeweilige Winkelstellung des Rotors verarbeitet, während der tatsächliche Positionswert der Achse nach Referenzaufnahme rechnerseitig geführt wird.

Die Wegesteuerung erhält von der NC-Ablaufsteuerung für maximal 6 Achsen Sollwertvorgaben, die sie nach der Proportionalmethode verarbeitet

$$\frac{s_i}{s_{ges\,i}} = \text{konst.}$$

$s_i$ von der Achse $i$ in der Zeit $t$ zurückgelegtes Wegstück; $s_{ges\,i}$ Gesamtweg der Achse $i$

Die programmierbare Verfahrgeschwindigkeit kann über Vorschuboverride von 0 ... 120% eingestellt werden. Sie wird auf achsspezifische Maximalwerte überwacht und ggf. auf diese reduziert. Anfahr- und Bremsrampen unterliegen einer Sollwertglättung, so daß Beschleunigungssprünge vermieden werden (Bild 7).

Die Rampensteilheit ist generierbar und zusätzlich programm- und/oder sensorseitig einstellbar (Beschleunigungsoverride; 25 ... 175% in 25%-Stufen). Roboterbewegungen können so an unterschiedliche Massenträgheitsmomente angepaßt werden. Weitere Funktionen sind u. a.:

- generierbare Vorendschalter und Endschalter
- wahlweise inkrementales oder metrisches Arbeiten
- mögliche Entkopplung eines getriebetechnisch linear verkoppelten Achspaares („elektronisches Getriebe")
- Funktionen digitaler Sensoren:
  - 2 Sensorgeschwindigkeiten
  - Sensorstop, rampen- und sprungförmig mit und ohne Beenden des Wegsatzes
- Fein- oder Grobpunktfunktion (Bild 8).

Zusätzlich werden an die Logiksteuerung Meldungen über aktive Achsen, deren Verfahrrichtung sowie Koinzidenz gegeben. Der Lageregler sichert durch einen Vergleich von $V_{soll}$ und $V_{ist}$ das Einhalten der programmierten Geschwindigkeit und ein genaues, asymptotisches Anfahren des Zielpunktes. In Verbindung mit den unterlagerten Hardwareregelern der Steller TDR 100 erzielt ein P-Regler sehr gute Ergebnisse (Bild 9). Einstellbar sind für jede Achse das Intervall der Koinzidenzmeldung, der Verstärkungsfaktor und die Lage des Referenzwertes $x$ im Verfahrbereich.

Für Sonderanwendungen sind ein Umschalten closed loop/open loop sowie die Funktion „Istwertkonstanz" vorgesehen. Einer ständigen Kontrolle unterliegen Meßelektronik, Plausibilität der D/A-Wandler- und Meßdaten sowie das Erreichen der Koinzidenz.

## 5. Bedientafel BT 700

Die BT 700 ist als intelligente Bedieneinheit ausgeführt und ist mit einem U880-Rechner, CTC, Anschluß-SIO und einem Speicherteil von 8 Kbyte EPROM (4 × U 556) und 1 Kbyte RAM ausgerüstet. Es ist über eine flexible Kabelverbindung der Maximallänge 15 m mit der Steuerung verbunden. Die Tableauelektronik ist auf einer zentralen Logikeinheit (TARE) und einer Anzeigebaugruppe (ANZ) untergebracht, die 8 Lumineszensdioden und 4 35-Punkt-Anzeigen VQC 10 ansteuert. Mit diesem 16stelligen Anzeigefenster können sämtliche ISO-Zeichen dargestellt werden. Das Bedienteil ist als Folientastatur mit 64 Tasten ausgeführt. 8 Tasten fungieren als Betriebsartenanwahl. Sie sind für Betriebsartenanzeige mit Lumineszensdioden bestückt. Es sind 8 Betriebsarten vorgesehen. Die Betriebsarten „Programmierung", „DNC" und „Offline" sind jeweils mit Unterbetriebsarten untersetzt, die menüartig von der Steuerung vorgegeben werden. Diese Unterbetriebsarten werden als mittels Tastendruck durchtaktbare Hauptmenübetriebsarten geführt, die ihrerseits wiederum durch Untermenübetriebsarten untersetzt werden können. Es ergibt sich somit in der Auswahl der Betriebsarten eine 3fache Auffächerung.

Mit 3 Tasten wird der Geschwindigkeitsoverride realisiert, der in 5%-Stufen Einstellungen von 0 ... 120% erlaubt. Das restliche Tastenfeld kann eingestellt werden in die Funktionalkomplexe:

- Einrichtbedientasten für
  - 12 Achsrichtungen
  - 12 Greiferfunktionen
  - 12 Peripheriefunktionen
- Bedientasten für
  - Programmanwahl
  - Start/Stop
  - Steuerspannung Aus
  - Anzeige Soll-/Istposition
  - Anzeige Programm/Schritt/Fehler
  - Anzeige für Eingabekontrolle
  - Links-/Rechtsverschiebung Anzeigefenster
  - Menüfortschaltung
- Eingabetasten für Programmierung und Generierung
  - Numerische Eingabe
  - +/−
  - Befehlseingabe für Roboterablaufprogramme
  - Befehlseingabe für SPS-Teil
  - Befehlsende
  - Korrekturtaste
  - Löschtaste für Zeichen und Programm.

msr 8623 (wird fortgesetzt)

# Informationen zu neuen internationalen Vorschriften der Elektro- und Automatisierungstechnik (Teil 2)[1]

**KTA 1401 (Entwurf Juni 1986)**

„Allgemeine Anforderungen an die Qualitätssicherung von Kernkraftwerken"
Die Regel des kerntechnischen Ausschusses der BRD soll zur Qualitätssicherung dienen und die erforderliche Vorsorge gegen Schäden oder bedeutsame Qualitätsbeeinträchtigungen für wichtige sicherheitstechnische Teile in ortsfesten Kernkraftwerken treffen. Im Anschluß an die festgelegten Termini und Definitionen enthält der Regelentwurf Festlegungen über

- grundsätzliche Anforderungen
- Organisation (Grundsätze und innerbetriebliche Organisation)
- Planung und Vorbereitung (Grundsätze, Prüfunterlagen, Prüfung, Änderung und Kennzeichnung von Unterlagen)
- Beschaffung, Fertigung, Montage, Errichtung einschließlich der Qualitätsprüfungen
- Inbetriebsetzung
- bestimmungsgemäßer Betrieb und Störfälle
- Meß- und Prüfeinrichtungen
- Behandlung fehlerhafter Einheiten
- erforderliche Dokumentationen
- Prüfung der Qualitätssicherungssysteme
- Anhang A mit weiteren ausgewählten Bestimmungen.

**VDI/VDE 3695 (Ausgabe Juli 1986)**

„Vorgestaltete Darstellung zur Prozeßführung über Bildschirme in verfahrenstechnische Anlagen"
In dieser Richtlinie werden Empfehlungen gegeben, wie Prozeßinformationen mit vorgestalteten Darstellungen zweckmäßigerweise dargeboten werden können. Hierbei werden insbesondere die Aspekte der Kodierung (Form, Farbe usw.) und der Organisation (Gliederung, Anordnung) von Informationen behandelt und anhand von Bildern beispielhaft erläutert. Desgleichen enthält die Richtlinie Minimalforderungen, die beim Einsatz von Farbsichtgeräten für die Prozeßführung berücksichtigt werden sollten.

**DIN VDE 0837 (Ausgabe Februar 1986)**

„Strahlungssicherheit von Laser-Einrichtungen, Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien"
Diese Norm ist identisch mit der IEC 825 Ausgabe 1984 und enthält neben den notwendigen Begriffen auch Anforderungen an die Herstellung, Klassifizierung der zugänglichen Strahlungswerte, Meß- und Berechnungsmethoden für die Strahlungswerte, zu verwendende Warn- und Hinweisschilder und Richtlinien für die Benutzer von Lasereinrichtungen. In den Richtlinien wird ausführlich auf die Sicherheitsvorkehrungen und die Gefahren beim Betrieb dieser Anlagen eingegangen und auf die existierenden BRD-Sicherheitsvorschriften hingewiesen.

**DIN VDE 0132 A2 (Ausgabe Februar 1986)**

„Brandbekämpfung im Bereich elektrotechnischer Anlagen"
Diese 2. Änderung enthält die detaillierten Festlegungen zu den Mindestabständen der verwendeten Löschgeräte, d. h. den zulässigen Abständen zwischen der Löschmittelaustrittsöffnung und den unter Spannung stehenden Teilen von elektrotechnischen Anlagen und den verwendeten Löschmitteln Wasser, Schaum, Pulver, Halon und Kohlendioxid.

**DIN 14675 (Ausgabe Mai 1986)**

„Brandmeldeanlagen"
Die 1. Änderung dieser Vorschrift enthält erforderliche Ergänzungen, die aufgrund von technischen Entwicklungen im Bereich von elektronischen Anzeigegeräten für den Einsatz in Brandmeldezentralen erforderlich wurden. Sie betreffen die notwendigen Definitionen für die Betriebszustände, Anzeigeeinrichtungen und deren Arten und enthalten neue Anforderungen für diese Einrichtungen.

**DIN VDE 0100 Teil 410 (Ausgabe März 1986)**

„Errichtung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V; Schutzmaßnahmen; Schutz gegen gefährliche Körperströme"
In dieser ergänzten Norm werden als Schutzeinrichtung für den zusätzlichen Schutz bei indirektem Berühren bei Einhaltung der vorgestellten Anforderungen Leitungsschutzschalter mit netzunabhängigen Differenzstromauslösern (LS/DI-Schalter) mit Nennauslösefehlerströmen auch unter $I_{\Delta N} = 30$ mA neu zugelassen.

**VDI/VDE-Richtlinie 2180, Bl. 1 (Ausgabe April 1986)**

„Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der MSR-Technik; Einführung, Begriffe, Erklärungen"
In dieser Richtlinie werden Grundlagen zur Anlagensicherung behandelt, die bei der Planung, Errichtung und dem Betrieb von Sicherungsanlagen mit MSR-Technik erforderlich sind und notwendige Begriffe erläutert.
Als Einrichtungen der MSR-Technik zur Anlagensicherung gelten hierbei Meßwertaufnehmer, -umformer und Grenzsignalgeber, Mittel zur Signalverarbeitung sowie Auslöser, Stellgeräte und Melder. Im Blatt 1 werden weiterhin die bestimmungsgemäße Arbeitsweise, die Auswirkungen bei nicht ordnungsgemäßer Arbeitsweise z. B. bei Auftreten aktiver bzw. passiver Fehler und Maßnahmen zur Sicherheit dieser Anlagen beschrieben. An Beispielen wird gezeigt, daß durch konstruktive und schaltungstechnische Maßnahmen in der Sicherheitseinrichtung oder durch mehrkanalige (redundante) Ausführungen die Fehler oder ihre Auswirkungen erheblich reduziert werden können.

**VDI/VDE-Richtlinie 2189, Bl. 2 (Ausgabe Februar 1986)**

„Beschreibung und Untersuchungen von 2- und 3-Punktreglern mit Rückführung"
Im Blatt 1 wurden für 2- und 3-Punktregler wesentliche Definitionen zur Lage der Schaltpunkte und Beschreibungen zu Verhaltensmerkmalen angegeben. Im Blatt 2 der Richtlinie werden dagegen 2- und 3-Punktregler mit Rückführung technisch, deren Zeitverhalten und weitere Gerätemerkmale beschrieben.

**DIN VDE 0110 Teil 10 (Entwurf Juli 1986)**

„Isolationskoordination für Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen; Spannungsprüfungen im Rahmen der Isolationskoordination"
Dieser als Ergänzung zum Abschnitt 8 der IEC-Publikation 664 herausgegebene Normentwurf enthält Festlegungen über geforderte Prüfungen, die zum Erreichen der Isolationskoordination bei der Typprüfung notwendig sind und zur Prüfung fester Isolierungen mittels Stehstoßspannungen.

[1]) Teil I erschien im Heft 1/1988.

### Auswertung

Nach der ersten Auswertung der im Jahre 1986 von internationalen IEC-Arbeitsgruppen durchgeführten Standardisierungsarbeiten für Elektro- und Automatisierungsanlagen kann festgestellt werden, daß sich diese besonders aktiv auf

- Aufbau, Zuordnung, Dokumentation, Programmierung und Qualitätsanforderungen für Mikroprozessorsysteme (Tagung der IEC-SC 47 im September 1986 in Stockholm)
- Aufbau von Informationsverarbeitungssystemen (Tagung der IEC-TC 97 im Mai 1986 in Washington)
- allgemeine Bestimmungen für elektronische Einrichtungen der Medizintechnik (Tagung der IEC-TC 62A im April 1986 in Budapest)
- kontinuierliche Überwachung und Instrumentierungen für den Strahlenschutz und entsprechende Warneinrichtungen (Tagung der IEC-SC 45b im Mai 1986 in Beijing/China)

konzentrierten. Dieser Trend wird sich international in den nächsten Jahren verstärkt fortsetzen. In der DDR ist es notwendig, diese neu herausgegebenen IEC- und Vorschriften anderer Länder stärker auszuwerten und wichtige exportbestimmende Festlegungen auch bei der Fertigung von DDR-Erzeugnissen schneller anzuwenden.

### Literatur


[1] *Kloust, H.*: Informationen zu neuen internationalen Vorschriften der Elektro- und Automatisierungstechnik. msr, Berlin 28 (1985) 11, S. 510–511.
[2] *Kloust, H.*: Informationen zu neuen internationalen Vorschriften der Elektro- und Automatisierungstechnik. msr, Berlin 29 (1986) 12, S. 558–561.
[3] DIN-Mitteilungen: Neues aus dem Normenwerk. Berlin/Offenbach: VDE-Verlag GmbH 65 (1986) 1 bis 12.
[4] etz: Normenanzeiger. etz 107 (1986) 1 bis 20.
[5] *Grütz, A.*: Jahrbuch zum VDE-Vorschriftenwerk 1985/86. Berlin/Offenbach: VDE-Verlag GmbH 1986.



Ing. Ing. *H. Kloust*, leitender wissenschaftlicher Mitarbeiter und Koordinierungsbeauftragter für Standardisierungsaufgaben der Automatisierungstechnik im ZFT des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau Berlin. msr 8671


# Modellbildungsrahmen von Zeitreihen als Grundlage für die Simulation dynamischer Systeme

## 0. Einleitung

In [2] wurde eine einfach handhabbare Methode (*direkte Iteration*) zur approximativen Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen begründet, die auf der konsequenten Anwendung der Zinseszinzrechnung in der Systemanalyse beruht.
Darin wird der Integrationsoperator

$$x(t) = \int_0^t y(\tau)\,\mathrm{d}\tau$$

durch die Rekursionsgleichungen

$$x(t + D) = x(t) \cdot [1 + DF(x(t))] = x(t) \cdot [1 + Dy(t)/x(t)] \quad \text{für} \quad y(t)/x(t) > 0\,,$$

$$x(t + D) = x(t) \cdot \frac{1}{1 - DF(x(t))} = \frac{1}{1 - Dy(t)/x(t)} \quad \text{für} \quad y(t)/x(t) < 0$$

mit

$$F(x(t)) = \frac{\mathrm{d} \ln x(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\dot{x}(t)}{x(t)} = \frac{y(t)}{x(t)} \qquad \text{(kontinuierliche Rate)}$$

nachgebildet.
Diese Methode beruht auf der taktweisen Ersetzung der gegebenen Zeitfunktion durch tangentiale Geradenstücke. Stärker wachstumsorientiert ist eine lokale Ersetzung der gegebenen Zeitfunktion durch tangierende Exponentialfunktionen. Dazu gehört ein Schema, das man als *natürliche Iteration* bezeichnen könnte und das durch die Iterationsvorschrift

$$x(t + D) = x(t) \cdot \exp\,(DF(x))$$

gegeben ist.
In diesem Beitrag werden beide Ansätze wesentlich verallgemeinert, indem beliebige lokale Modelle zugelassen werden, die als Integrationsverfahren unterschiedlicher Ordnung interpretiert werden können. Die Vielfalt möglicher Ansätze für die Simulation der Lösungen gewöhnlicher Differentialgleichungen soll gezeigt werden.

## 1. Lokale Zeitreihenmodelle als Grundlage für die approximative Beschreibung der Systemdynamik

Beiden angeführten Methoden der Übersetzung einer gewöhnlichen Differentialgleichung in eine Iterationsgleichung ist die Verwendung eines lokalen Modells

$$x'/x = g(D, F(x))$$

mit der Schrittweite $D$ und der kontinuierlichen Rate $F(x)$ gemeinsam. Ein lokales lineares Modell führt zur direkten Iteration, ein lokales Modell auf der Grundlage der Exponentialfunktion zur natürlichen Iteration.
Es wird auf solche lokale Modelle orientiert, die an der betreffenden Referenzstelle mit dem Wert der zu simulierenden Funktion und ihrer ersten Ableitung übereinstimmen. Damit ein lokales Modell als Grundlage eines entsprechenden Iterationsverfahrens dienen kann, sind einige Konsistenzbedingungen zu erfüllen. Diese beziehen sich neben der Modellfunktion $g(D, F(x))$ auch auf deren Quasidifferenzenquotienten $f(D, F(x))$ der durch

$$g(D, u) = 1 + Df(D, u)$$

definiert ist.
Gefordert werden:

1. $\mathrm{sgn}\,(f(D, u)) = \mathrm{sgn}(u)$
2. $g(D, u)$ und $f(D, u)$ monoton wachsende Funktionen in $u$
3. $\lim\limits_{D \to 0} f(D, u) = u$.

Unter Beachtung dieser Bedingungen kann man eine große Vielfalt von Möglichkeiten für die Umsetzung von gewöhnlichen Differentialgleichungen in Iterationsgleichungen erschließen. Hinzu kommt, daß man in den lokalen Modellen auch auf Ableitungen höherer Ordnung Bezug nehmen kann.

## 2. Beispiele für den allgemeinen Ansatz

### 2.1. *Lokale Modelle aus der Taylor-Reihe*

Bei Abbruch der Taylor-Reihe nach dem quadratischen Glied erhält man

$$x(t + D) = x(t) + D\dot{x}(t) + \tfrac{1}{2} D^2 \ddot{x}(t)\,.$$

Die Verwendung dieses lokalen Modells entspricht der Anwendung der Trapezregel der Iteration. Mit $\dot{x}(t) = y(t)$ und Ersetzen der zweiten Ableitung durch den Differenzenquotienten $(y(t + D) - y(t))/D$ ergibt dieses Modell die Trapezregel

$$x(t + D) = x(t) + \tfrac{1}{2} D(y(t) + y(t + D))\,.$$

Nach den Regeln der direkten Iteration kann das lokale Taylor-Reihen-Modell umgesetzt werden in

$$x(t + D) = x(t) \cdot [1 + F(x)\, D(1 + \tfrac{1}{2} DF(\dot{x}))]\,,$$

$$F(\dot{x}) = \mathrm{d} \ln \dot{x}/\mathrm{d}t = \ddot{x}/\dot{x}\,,$$

wobei der Ausdruck in den runden Klammern als eine von der zweiten Ableitung abhängige Schrittweitensteuerung angesehen werden kann. Nach der natürlichen Iteration erhält man

$$x(t + D) = x(t) \cdot \exp\,[DF(x) \cdot \exp\,(\tfrac{1}{2} DF(\dot{x}))]\,.$$

Diese Gleichung kann man leicht auf ein Taylor-Modell höherer Ordnung erweitern und bekommt dann die allgemeine Beziehung

$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp\{DF(x) \cdot \exp[\tfrac{1}{2} DF(\dot{x}) \cdot \exp \times$$
$$\times (\tfrac{1}{3} DF(\ddot{x}) \ldots)]\} .$$

Die Beschränkung auf lokale Taylor-Modelle ist jedoch nicht zwangsläufig.

### 2.2. *Lokale Modelle auf der Grundlage lokaler Exponentialkettenentwicklungen*

Eine Exponentialkette ist durch die gekoppelten Differentialgleichungen

$$F(x_i) = K_i x_{i+1}; \qquad i = 1, 2, \ldots, n; \qquad x_{n+1} = 1$$

gegeben.
Wird die Kettenentwicklung nach der ersten Stufe abgebrochen, so gilt

$$F(\dot{x}) = K_1$$

mit der Lösung

$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp(DF(x)) .$$

Dieses Kettenmodell entspricht genau der Modellgrundlage der natürlichen Iteration.
Ein lokales Exponentialkettenmodell 2. Ordnung führt auf

$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp\{DF(x) \cdot [\exp(DF^2(x) - 1)/DF^2(x)]\}$$ [1]).

Offenbar wird hier die Schrittweite $D$ durch die von der zweiten logarithmischen Ableitung abhängigen Exponentialfunktion gesteuert.

### 2.3. *Weitere lokale Modelle*

Ohne die Herleitung im einzelnen zu begründen, soll zum Abschluß noch eine Reihe weiterer lokaler Modelle angeführt werden, die alle als Grundlage entsprechender Iterationssimulationen gewöhnlicher Differentialgleichungen dienen können. Ihnen ist eine Zeitseparation in die globale laufende Zeit $t$ und die lokale inkrementale Zeit $D$ gemeinsam.

*1. Harmonisches lokales Modell*

$$x(t+D) = A + B\cos(\omega D) + C\sin(\omega D)$$

$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp\left\{DF(x) \cdot \frac{\sin(\omega D)}{(\omega D)} \times \right.$$
$$\left. \times \exp\left[D\dot{F}(x) \frac{1 - \cos(\omega D)}{(\omega D)\sin(\omega D)}\right]\right\} .$$

*2. Lokale Logistik*

$$x(t+D) = m/(n + \exp(-aD)) ,$$

$$x(t+D) = x(t) \frac{B/x(t)}{1 + (B/x(t) - 1) \cdot \exp(-KBD)} .$$

Hierbei sind

$$K = -\frac{\dot{F}(x)}{\dot{x}}, \qquad B = x(t) + \frac{F(x)}{K} .$$

*3. Lokales Masse-Feder-Dämpfungs-System (MFD-System)*

$$x(t+D) = A\exp(-lD) \cdot \cos(\omega D - \varphi) ,$$

$$x(t+D) = x(t) \cdot \frac{\exp(-lD) \cdot \cos(\omega D - \varphi)}{\tan\varphi} .$$

Die erforderlichen Parameter $l, \omega, \varphi$ ergeben sich durch Lösung der Gleichungen:

$$\frac{\dot{x}(t)}{x(t)} = -l - \omega \cdot \tan\varphi ,$$

$$\frac{\ddot{x}(t)}{x(t)} = l^2 - \omega^2 + 2\omega l \cdot \tan\varphi ,$$

$$\frac{\dddot{x}(t)}{x(t)} = 3\omega^2 l - l^3 + (\omega^3 - 3\omega l^2)\tan\varphi .$$

[1]) Im gesamten Beitrag gelten: $F^2(x) = F(F(x))$, $F^3(x) = F(F(F(x))$ usw.

*4. Lokales nichtschwingendes MFD-System*

$$x(t+D) = A\exp(-aD) + B\exp(-bD) .$$

Die Parameter des lokalen Modells ergeben sich als Lösung der folgenden Gleichungen

$$x(t) = A + B ,$$
$$\dot{x}(t) = -aA - bB ,$$
$$\ddot{x}(t) = a^2 A + b^2 B ,$$
$$\dddot{x}(t) = -a^3 A - b^3 B .$$

$1/a$ bzw. $1/b$ ergibt sich dann als Lösung $u$ der „charakteristischen" Gleichung

$$A_0 u^2 + A_1 u + A_2 = 0$$

mit

$$A_0 = (\ddot{x}(t))^2 - \dot{x}(t) \cdot \dddot{x}(t) ,$$
$$A_1 = \dot{x}(t) \cdot \ddot{x}(t) - x(t) \cdot \dddot{x}(t) ,$$
$$A_2 = (\dot{x}(t))^2 - x(t) \cdot \ddot{x}(t) .$$

Dies sind zugleich die Bestimmungsgleichungen für die Parameter der entsprechenden gewöhnlichen Differentialgleichung.

*5. Lokale Gauß-Glockenkurve*

$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp(-BD^2 - CD) ,$$
$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp[DF(x) \cdot \exp(\tfrac{1}{2} DF^2(x))] .$$

Dies ist für den 2dimensionalen Fall offenbar eine ernstzunehmende Alternative zur lokalen Taylor-Entwicklung. Mithin bietet sich das folgende mehrdimensionale Analogon an

$$x(t+D) = x(t) \cdot \exp\{DF(x)\exp[\tfrac{1}{2} DF^2(x) \times$$
$$\times \exp(\tfrac{1}{3} F^3(x) \ldots)]\} .$$

*6. Pearson-analoge Schar lokaler Modelle*

Das lokale Modell wird bestimmt durch Integration (explizit ausführbar) der folgenden gewöhnlichen Differentialgleichung

$$\frac{dx}{dD} = \frac{x \cdot (AD + B)}{MD + N} .$$

Die Parameter bestimmen sich aus den Werten und den Ableitungen der Funktion $x(t)$.

*7. Lokales Hyperbelmodell*

$$x(t+D) = \frac{A}{(B - D)^k} ,$$

$$x(t+D) = \frac{x(t)}{(1 - DF^2(x))^{F(x)/F^2(x)}} .$$

*8. Lokales logarithmisches Wachstumsmodell*

$$x(t+D) = A + B(1+D)^{-k} \cdot \ln(1+D) .$$

Durch Kombination mit der natürlichen Iteration ergibt sich

$$x(t+D) = x(t) \cdot (1+D)^{F(x)(1+D)^{0,5 \cdot (\dot{F}(x)+1)}} .$$

Mit jedem dieser Modelle korrespondiert ein entsprechendes numerisches Integrationsverfahren. Es ist eine dankbare Aufgabe der numerischen Mathematik, die besonderen Vorzüge und Nachteile der so entstehenden numerischen Integrationsverfahren zu untersuchen und mit den bewährten Integrationsverfahren einerseits und den Spline-Approximationen der Lösungen andererseits zu vergleichen.

**Literatur**


[1] *Peschel, M.; Mende, W.:* Predator-Prey Models — Do we live in a Volterra World? Berlin: Akademie-Verlag 1986; Wien: Springer-Verlag 1986.
[2] *Peschel, M.; Mende, W.; Breitenecker, F.:* Anwendung der Theorie ratengekoppelter Systeme in der Regelungstechnik. msr, Berlin 30 (1987) 7, S. 322 bis 324.
[3] *Voigt, H. M.:* Evolution und Optimierung. Dissertation B. AdW der DDR, 1986.



Prof. Dr. rer. nat. habil. *M. Peschel*, Dr. sc. nat. *H. M. Voigt*, AdW der DDR, Zentrum für Wissenschaftlichen Gerätebau; Dipl.-Math. *W. Mende*, AdW der DDR, Institut für Geografie und Geoökologie; Doz. Dr. *F. Breitenecker*, TU Wien, Institut für Technische Mathematik.


msr 8781

## 10. Wissenschaftlich-Technische Konferenz „Elektronische Automatisierungssysteme" (WTK)

Die Jubiläums-WTK der WGMA fand am 27. und 28. Oktober 1987 im Kurhaus von Warnemünde statt.
Den 200 Teilnehmern wurden in diesen Räumen sehr angenehme Tagungsbedingungen geboten. Wie in den vergangenen Jahren zeichnete für das wissenschaftliche Programm der FA Automatisierungsgeräte der WGMA verantwortlich.
Mit der 10. WTK der WGMA wurde einerseits eine inzwischen zur Tradition gewordene Linie, die Vorstellung neuer Automatisierungsgeräte und -systeme, fortgesetzt, andererseits aber auch ein für die Automatisierungstechnik neues Fachgebiet aufgegriffen, „Experten-/Beratungssysteme" für die Anwendung in Automatisierungslösungen. Damit wird versucht, neuere Forschungsergebnisse der künstlichen Intelligenz für die Automatisietungstechnik nutzbar zu machen. Diesem Gedanken wurde auch im Plenarvortrag von Prof. *H. Fuchs*, Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW/Berlin, nachgegangen.

Die fachliche Orientierung dieser Jubiläumsveranstaltung reichte demnach von wissensverarbeitenden Systemen, Expertensystemen bei der Diagnose bis zu neuen gerätetechnischen Lösungen, wie universellen speicherprogrammierbaren Einrichtungen S 2000 und neuen Automatisierungskonzepten.
In das Programm wurden Beiträge aufgenommen, die von erfahrenen Hochschullehrern, Forschern der AdW und Industrievertretern dargeboten wurden.
Die Teilnehmer diskutierten 20 Vorträge der Sektionen:

*Sektion 1* „Experten-/Beratungssysteme in der Automatisierungstechnik"

*Sektion 2* „Elektronische Automatisierungssysteme und ihr Einsatz in der Schiffsautomatisierung".

Wissensbasierte Systeme standen im Mittelpunkt der Vorträge und Diskussionen zur Sektion 1. Es zeigte sich, daß der Übergang von der Datenverarbeitung zur Wissensverarbeitung kurz vor der Nutzung steht und keine Utopie mehr ist. Es wurden nicht nur neue Leistungsmerkmale der Automatisierungstechnik mit Wissensstützung dargelegt, sondern es zeigten sich auch die Schwierigkeiten, das Wissen, das in Form von Erfahrungen vorliegt, in Formen zu bringen, die einer Wissensverarbeitung zugänglich sind. Mit der Sektion 1 stellte sich erstmals der neu gebildete FA „Beratungs-/Expertensysteme in der Automatisierungstechnik" (Leitung: Prof. *J. Wernstedt*/TH Ilmenau) der Öffentlichkeit vor.
In der Sektion 2 standen neue Automatisierungskonzepte und Gerätelösungen im Mittelpunkt der Vorträge. Es wurde sichtbar, daß neue Automatisierungslösungen nur als Einheit von Hardware, Software und Entwurfshilfsmitteln erfolgversprechend sind. Erwartungsgemäß spielten Echtzeitfähigkeit der Systeme, Verkopplung zu hierarchischen Systemen und lokalen Netze eine wesentliche Rolle. Aus territorialen Gründen bezogen sich viele Anwendungslösungen auf den Schiffseinsatz.
Die 10. WTK der WGMA war eine erfolgreiche Veranstaltung, mit der die WGMA einen Beitrag zur Vorbereitung des 9. Kongresses der KDT geleistet hat. Die 11. WTK findet am 4. und 5. Mai 1988 in Berlin statt und wird neue elektronische Automatisierungslösungen vorstellen. Die wissenschaftliche Vorbereitung liegt in den Händen des neu gegründeten FA „Automatisierungssysteme" (Leitung: Prof. *P. Neumann*/TU „Otto von Guericke" Magdeburg).

msr 8801 *H. Fuchs*

## Zielstellung des Fachausschusses „Beratungs-/Expertensysteme in der Automatisierungstechnik" der WGMA in der KDT

Im Heft 10/1987 der msr wurde bereits kurz über die Bildung des neuen Fachausschusses der WGMA „Beratungs-/Expertensysteme in der Automatisierungstechnik" berichtet.

Nachdem durch den Fachausschuß die Sektion 1 „Experten-/Beratungssysteme in der Automatisierungstechnik" der 10. WTK der WGMA in Warnemünde erfolgreich gestaltet worden ist, und in der Folgezeit von vielen Seiten großes Interesse an der Arbeit des Fachausschusses gezeigt wurde, sollen im folgenden die Zielstellungen des Fachausschusses dargelegt werden.

Der Fachausschuß stellt sich das Ziel, die Aktivitäten auf dem Gebiet des Entwurfs und der Realisierung von Beratungs-/Expertensystemen zur Lösung von Diagnose-, Überwachungs-, Steuerungs- und Planungsaufgaben von Mengen- und/oder Qualitätsparametern in technischen und nichttechnischen Prozessen im Rahmen der WGMA zu koordinieren.

Durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Automatisierung und Computertechnik ist die Bewältigung der genannten Aufgaben zunehmend durch automatisierte Systeme erforderlich, in denen der Mensch als Entscheidungsträger eine zentrale Position einnimmt.
Charakteristisch für den Einsatz von Entscheidungshilfen für den Menschen auf der Grundlage von Beratungs-/Expertensystemen sind technische und nichttechnische Prozesse, die durch Unsicherheit, Komplexität und Dynamik gekennzeichnet sind. Weiterhin liegen für die Lösung der Aufgaben in der Regel Zielvorgaben vor. Die Beratungs-/Expertensysteme geben dem Operateur Entscheidungshilfen auf den Niveauebenen:

1. Unterstützung der Entscheidungsvorbereitung
2. Unterstützung bei der eigentlichen Entscheidungsfindung
3. Eingriff in die Entscheidungsrealisierung.

Vorgesehene Arbeitsgebiete des Fachausschusses sind:

I. Analyse zweckmäßiger Einsatzgebiete von Beratungs-/Expertensystemen in der Prozeßautomatisierung
   - Zusammenhang von Wissens- und Steuerkonzept
   - Notwendigkeit des Menschen im Entscheidungskonzept (Mensch-Maschine-System)
   - Analyse der ideologischen, moralischen und ökonomischen Effekte des Einsatzes von Beratungs-/Expertensystemen.

II. Entwurfsstrategien für Beratungs-/Expertensysteme, insbesondere unter den Bedingungen
   - Vergabe von Entscheidungs-/Steuerzielen
   - On-line-Kopplung an den Prozeß
   - Echtzeitforderungen
   - dynamische Prozesse,

   in folgenden Hauptlinien und ihren Kombinationen
   - analytische Modelle und Algorithmen
   - deskriptive Modelle in Form von Fakten und Regeln

- erfolgsbewertete Daten (Handlungsanalyse des Operateurs).

III. Methoden zur Ermittlung und Darstellung des erforderlichen Wissens
- Anwendung von Methoden zur Ermittlung und Darstellung des Wissens in Form von analytischen Modellen, von Algorithmen zur Erstellung von Signal- und Systemmodellen
- Anwendung von Methoden zur Ermittlung des Wissens in Form von Fakten, Regeln (determiniert, statistisch, fuzzy) und der Handlungsanalyse des Experten.

IV. Anwendung von Methoden zur Lösung des Entscheidungs-/Steuerproblems (Problemlösung), insbesondere zum Entwurf auf der Basis
- subjektiver unscharfer Steuerregeln (Fuzzy-Theorie)
- eines Modells in Form logischer Regeln (Prädikatenlogik, Produktionssysteme)
- bewertbarer Endzustände (Entscheidungstheorie)
- eines Modells in Gleichungsform (Optimierung, Vorhersage)
- erfolgsbewerteter Handlungen des Menschen (automatische Klassifikation)

sowie der Kombinationen dieser Methoden.

V. Nutzung von Mitteln/Ergebnissen der Informatik auf folgenden Gebieten
- Sprachkonzepte (logische Sprachen, kombinierte Sprachkonzepte)
- Methoden der Wissensspeicherung und -darstellung
- Methoden der logischen Wissensverarbeitung
- Dialogführung „Mensch — Rechner"
- Rahmensystem für das Teilgebiet der Expertensysteme.

Im Rahmen des Fachausschusses werden zur effektiven Nutzung der Werkzeuge der Informatik spezielle Entwicklungen unter den Aspekten der
- Echtzeitanforderungen
- begrenzten Zeit zur Entscheidungsfindung
- Unterbrechung des Entscheidungsvorganges durch Prioritätensteuerungen
- Verwendung gemischter Wissens- und Entscheidungsstrategien

durchgeführt.

VI. Abstimmung zur Erstellung und Nutzung von Geräte- und Softwaremodulen für Beratungs-/Expertensysteme in DDR-weitem Rahmen.

VII. Erstellung einer Projektsammlung von realisierten Einsatzfällen.

VIII. Durchführung von Tagungen und Weiterbildungsveranstaltungen auf dem Gebiet des Fachausschusses.

Mit diesem Arbeitsprogramm will der Fachausschuß „Beratungs-/Expertensysteme in der Automatisierungstechnik" der WGMA dazu beitragen, daß komplexe technische und nichttechnische Prozesse effektiver entworfen, diagnostiziert, überwacht und gesteuert werden können. Gleichzeitig sollen die entworfenen Beratungs-/Expertensysteme den Menschen als Entscheidungsträger unterstützen, damit er, den gesamtgesellschaftlichen Zielen entsprechend, seine Aufgaben in automatisierten Systemen immer besser wahrnehmen kann.

msr 8810 Prof. Dr. sc. techn. *J. Wernstedt*, Vorsitzender des FA „Beratungs-/Expertensysteme in der Automatisierungstechnik" der WGMA

## msr PERSÖNLICHES

# Würde eines „Doktor-Ingenieurs Ehrenhalber" von der Technischen Universität Dresden an Prof. em. Dr. sc. techn. Karl Reinisch verliehen

„In Würdigung seines Beitrages zur Entwicklung der Theorie der automatischen Steuerung und deren Anwendung sowie für seine Verdienste um eine moderne Aus- und Weiterbildung auf dem Gebiet der Prozeßsteuerung" lautet die Begründung für die am 29. Oktober 1987 an der TU Dresden vorgenommene Ehrung.

Das fachliche Wirken von Prof. *Reinisch* begann Anfang der 50er Jahre am Institut für Allgemeine Elektrotechnik der TH Dresden. Mit seinem 1957 vollzogenen Wechsel an die Arbeitsstelle für Regelungs- und Steuerungstechnik der AdW, die gerade in diesem Jahr gegründet wurde, wuchs die Ausstrahlung von Prof. *Reinisch*. Hier profilierte er sich zu einem national und international hochgeschätzten Spezialisten der Regelungstechnik.

Seine 1965 erfolgte Berufung zum Professor und zum Direktor des Instituts

für Regelungstechnik an die TH Ilmenau beendete die fruchtbaren „Dresdner Jahre", während der er deutliche Spuren seines Wirkens hinterließ.

Mit der Ehrenpromotion an der TU Dresden wurde nach 22 Jahren außerordentlich effektiver und erfolgreicher Arbeit in Ilmenau für Prof. *Reinisch* der (Regel-)Kreis mit höchsten Gütemerkmalen geschlossen.

Die Persönlichkeit und das Schaffen von *Karl Reinisch* wurden nicht nur im Heft 8/1986 der msr umfassend gewürdigt, sondern sind den Fachleuten der Regelungstechnik seit vielen Jahren ein Begriff.

Hier sollte deshalb vor allem Gelegenheit genommen werden, Professor *Reinisch* im Namen seiner Freunde und Fachkollegen zu dieser hohen Ehrung ganz herzlich zu gratulieren und ihm weitere erfolgreiche Jahre bei bester Gesundheit zu wünschen.

*Heinz Töpfer*

*Die Mitarbeiter der Redaktion msr schließen sich den Glückwünschen zu dieser ehrenvollen Auszeichnung ihres langjährigen Redaktionsbeiratsmitgliedes an und verbinden damit, neben dem Dank für die geleistete Arbeit, den Wunsch, auch weiterhin auf die gewichtige Stimme des Geehrten zählen zu können.*

## Herzlichen Glückwunsch zum Geburtstag, lieber Lektor Jürgen Reichenbach!

Damit ein Buch beim Leser ankommt, muß viel getan werden. Dabei bilden sich Partnerschaften.

Aus der Sicht einer solchen Partnerschaft schreibt heute der eine Partner, der Autor, einen herzlichen Glückwunsch an den anderen, den Lektor. Äußerer Anlaß: der Sechzigste!

Dipl.-Ing. *Jürgen Reichenbach*, am 22. Februar 1928 in Münster/Westfalen geboren, aber von der eigentlichen Heimat her ein Greifswalder (was nach Sprache, Typus und Segelleidenschaft heute noch unverkennbar ist), konnte demnach am 22. Februar 1988 seinen 60. Geburtstag feiern.

Seit 1954 ist er als Lektor im VEB Verlag Technik tätig, und als solcher war er dem Schreiber dieser Zeilen schon zu Beginn der 60er Jahre ein Begriff. Zunächst aus zahlreichen Telefongesprächen, die der Senior der Regelungstechnik in der DDR und Chef des jungen Assistenten, Prof. *H. Kindler*, mit seinem Lektor führte. Dann machte eben dieser Lektor im Jahre 1960 Prof. *Kindler* den Vorschlag, den damals frisch promovierten Assistenten *B.* in die Arbeiten zur Herausgabe der deutschen Übersetzung von *Solodownikow* „Bauelemente der Regelungstechnik" einzubeziehen — und hieraus hat sich ein niemals unterbrochener Kontakt über mehr als 25 Jahre ergeben, immer auf dem Fachgebiet, für das *Jürgen Reichenbach* ab 1957 als Verantwortlicher Lektor zeichnet: der Automatisierungstechnik. Waren es zu Anfang dieser Jahre wohl überwiegend Übersetzungen, mit denen *J. Reichenbach* dem in der DDR wie auch anderwärts jungen Fachgebiet

„Regelungstechnik" zu einem erfolgreichen Start verhelfen konnte (dem oben genannten Werk von *Solodownikow* über Bauelemente war ja z. B. schon ein ebenfalls zweibändiges Werk über die Grundlagen der selbsttätigen Regelung vorausgegangen), so haben sich im Laufe der Jahrzehnte viele, viele Bücher von Autoren der DDR dazu gesellt, mit dem kleinen Vermerk im Impressum „Lektor: *Jürgen Reichenbach*". Wieviel es insgesamt waren? Im VEB Verlag Technik wußte es leider niemand so ganz genau zu sagen. Ob der Jubilar selber Buch führt? So bei 200 Titel müssen es schon gewesen sein, denen *J. Reichenbach* den Weg zu den Lesern gebahnt hat. Dabei sind die Buchreihen nicht mitgezählt worden. Nehmen wir z. B. die jüngste Reihe, die der Initiative des Geburtstagskindes ihre Existenz verdankt, die Reihe TECHNISCHE INFORMATIK. Oder die älteste, nämlich die REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK, die es seit dem Jahr 1961 gibt, und als deren geistiger Vater sich *J. Reichenbach* mit Recht betrachten darf. Mehr als 230 Bände sind es inzwischen in der „RA", die als Bestandteile eines mobilen Handbuchs ihren Weg zu den Lesern gefunden haben, und dies in einer Gesamtauflage, die schon vor Jahren die Millionengrenze überschritten hat.

Die Arbeit eines Lektors, wie ist sie eigentlich? Der Autor und Herausgeber lernt ihn als Partner kennen, im Falle von *Jürgen Reichenbach* als einen immer anregenden und fordernden Partner, mit eigenen Vorschlägen, großer Erfahrung und immer beherzigenswerten Hinweisen. Natürlich auch in der Rolle des Vertreters des Verlages, mit dem z. B. Erscheinungstermine erörtert werden müssen. Wie sich der Lektor wohl dabei fühlen mag? Etwa wie ein Bediensteter der Reichsbahn, an dem die Reisenden ihren Unmut über die „komplizierte Situation" in unserem Verkehrswesen auslassen, obwohl er wirklich nichts dafür kann?

Möglicherweise sind dies Schattenseiten im Lektorberuf, aber wo gäbe es solche nicht!

Zu den lichten Seiten gehört aber auf alle Fälle das stolze Gefühl, eine ganz wesentliche, ich stehe nicht an zu sagen, entscheidende Rolle in der Förderung der Automatisierungstechnik in der DDR gespielt zu haben und weiterhin spielen zu können.

Auch dazu meine herzlichsten Glückwünsche, lieber Lektor, und diejenigen von Hunderten von Autoren und Hunderttausenden von Lesern!

*Georg Brack*

*Diesen herzlichen Glückwünschen schließen sich die Mitarbeiter des Hauses und besonders der Redaktion msr an und verbinden damit den Dank für die stets konstruktive Zusammenarbeit.*


## In eigener Sache!

Für die Stelle eines Fachredakteurs für die „msr" suchen wir ab sofort einen geeigneten Mitarbeiter, der in oder bei Berlin über Wohnraum verfügt. Er sollte ein abgeschlossenes Hochschulstudium in der Fachrichtung Technische Kybernetik/Automatisierungstechnik oder in einem angrenzenden Gebiet (z. B. Technische Informatik oder Elektrotechnik/Elektronik) haben und die deutsche Sprache sicher beherrschen.

Seine Aufgaben umfassen:

- redaktionelle und fachliche Bearbeitung von Manuskripten
- Besuch und Auswertung von Fachtagungen, -messen und -ausstellungen
- fachbezogene eigenjournalistische Tätigkeit.

**Interessenten wenden sich bitte an:**

VEB Verlag Technik
Oranienburger Str. 13/14
Berlin
1020

Redaktion „messen · steuern · regeln"
Tel.: 2870362
2870374

# Bericht vom IFAC-Weltkongreß, Teil 2[1)]

### 12.1.1. Large Scale Systems: Analysis, Stability

Schwerpunkt dieser Sektion waren die Stabilitätsuntersuchungen für große Systeme. Dabei war der Beitrag von *J. Lunze*/DDR der weitaus wertvollste.
Der Stand der Arbeiten in der DDR berechtigt zu dem Vorhaben, ein IFAC-Symposium „Large Scale Systems" 1989 in Berlin durchzuführen.

### 12.1.2. Large Scale Systems: Mathematical Programming and Numerical Features

Schwerpunkte in dieser Sektion waren Parallelverarbeitung durch Spezialarchitekturen von Rechnern, die Behandlung nichtlinearer großer Systeme und dynamischer Programmierung; Beispiele für die Anwendung werden sparsam benutzt. *J.-N. Lin, Y.-Z. Lu*/VR China demonstrierten Ergebnisse am Beispiel eines Industrieofens in Walzwerken.

### 12.1.3. Large Scale Systems: Decentralized Control

Die Beiträge gaben einen guten Überblick über die dezentralisierte Steuerung großer Systeme.
Ein wertvoller Beitrag war der von *P. Wiemer, H. Unbehauen*/BRD, der eine direkte, dezentralisierte, adaptive Regelung mit Referenzmodell behandelte. An einem Beispiel wurden die guten Ergebnisse bestätigt.
Ohne direkten praktischen Bezug blieben die theoretischen Ausführungen von *Yang Yong-Zhi*/VR China, die sich mit Stabilitätsproblemen in großen Systemen beschäftigten.
Weitergehende originelle Methoden wurden nicht geboten.

### 12.1.4. Large Scale Systems: Multilevel Control

Alle Beiträge dieser Sektion zeigten ausschließlich theoretische Ergebnisse, allerdings mit einigen originellen Details. Vermißt wurden industriewirksame Beispiele. Bei den vorgetragenen Beispielen handelte es sich stets um stilisierte Annahmen oder Modellversuche.
Im Mittelpunkt der Beiträge standen Methoden der Dekomposition zur besseren Beherrschung des Problems bei großen Systemen und hierarchischen Strukturen. Einen lesenswerten Beitrag lieferten *L. Lopez*/Schweiz, *F. Pautzke, R. Schockenhoff*/BRD. Dieser hatte als einziger einen konkreten physikalischen Bezug zum Elektroenergienetz.

### 12.1.5. Large Scale Systems: Networks

In dieser Sektion wurden 4 Beiträge angeboten, die sehr unterschiedliche Zielrichtungen hatten, z. B. Regelung in Telefonnetzen (*J. Filipiak*/VR Polen) oder spezielle Strukturen in der Entscheidungsfindung des Menschen (*P. A. Remy* u. a./USA).
Einen anwendungsbezogenen Beitrag leisteten *D. P. Bertsekas, J. Eckstein*/USA mit Methoden zur Behandlung von Fließproblemen in linearen Netzwerken.
Einen originellen Beitrag brachten *K. Kawano, K. Mori, M. Koizumi*/Japan zur Fehlertoleranz in dezentralisierten Steuerungssystemen mit Untersuchungen in molekularbiologischen Systemen.

### 12.4.1. Advanced CAD Environments

Die vier Beiträge dieser Sektion gaben einen guten, aber keinen vollständigen Überblick über das Fachgebiet. Die erste Einschränkung bezieht sich auf die CAD-Umgebung für Automatisierungssysteme und die zweite auf die unvollständige Behandlung der Umgebung. Diese Unvollständigkeit ist auf zu wenig Vortragsanmeldungen und auf Ablehnung aufgrund mangelnder Qualität zurückzuführen. Wesentliche Gedanken in dieser Sektion betrafen die Einbeziehung von Forschungsergebnissen aus der künstlichen Intelligenz (KI), z. B. der Einsatz von Expertensystemen.

### 12.4.2. New Techniques for CAD

Mit der international sich ständig verbreiternden Basis für leistungsfähige Arbeitsplatzrechner ist deren Einsatz für den rechnergestützten Entwurf von Automatisierungssystemen (CACSD — Computer aided control system design) nicht nur zum gegenwärtigen Standard, sondern — bedingt durch erhöhte Forderungen nach parameteroptimiertem Systementwurf — auch zur Notwendigkeit geworden. Als häufig verwendete Rechentechnik sind Arbeitsstationen der marktführenden Firmen *DEC, Apollo* und *Sun* sowie Personalcomputer anzutreffen. Neben Programmpaketen für Simulationszwecke entstehen zunehmend rechnergestützte Verfahren für Analyse, Entwurf und Identifikation von Systemen. Insbesondere für die numerische Analyse sind solche Softwarepakete wie MATRIX-X, CONTROL-C oder MATLAB verbreitete Werkzeuge. Der für die Automatisierungstechnik insgesamt zu verzeichnende Trend zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Kommunikation ist auch auf dem CACSD-Sektor, insbesondere durch verstärkte Bemühungen zur Gestaltung nutzerfreundlicher Interfaces in ingenieurtechnischen Anwendungen, festzustellen. Dabei ist die Einbeziehung grafischer Benutzeroberflächen für den interaktiven Dialog ein wesentliches Element. Die Leistungsfähigkeit der einsetzbaren Rechentechnik gestattet in zunehmendem Maße die Lösung des Schlüsselproblems der Akzeptanz rechnergestützter Entwurfsverfahren: die Anwendung von CACSD-Methoden in einer in der bisherigen Ingenieurpraxis üblichen Form. Die dargestellten Aussagen spiegeln sich auch in den Beiträgen der o. g. Sektion wider. *J. O. Gray, R. A. King*/GB stellen in ihrer Arbeit die Entwicklung eines grafischen Interfaces für (Standard-) Softwarepakete zur Analyse und Synthese von Steuerungssystemen vor. Es wurde von der Erkenntnis ausgegangen, daß zur Nutzung von Programmen zur Analyse/Synthese im Zeit- oder Frequenzbereich oder zur Systemsimulation in der Regel eine Transformation der systembeschreibenden Parameter aus üblichen Darstellungsformen in abstraktere zur direkten Eingabe in Verarbeitungsalgorithmen erfolgt.

Das entwickelte Programmsystem gestattet die grafische Darstellung komplexer dynamischer Konfigurationen in Form von üblichen Blockschaltbildern. Eine dazu entwickelte Grafiksprache ermöglicht die Erzeugung von Strukturen mit grafischen und dynamischen Inhalten, die auch verwendet werden, um notwendige Schnittstellen zu den vom Anwender ausgewählten Applikationsprogrammen (also Synthese-, Analyse- oder Simulationspakete) zu schaffen. Das bedeutet, daß ein Block eines in üblicher Blockdiagrammdarstellung abgebildeten Steuersystems nicht nur eine bildliche Beschreibung einer Systemkomponente darstellt, sondern auch das dazugehörige dynamische Verhalten beinhaltet. Auf diese Weise ist es möglich, daß in einem durch Verbinden mehrerer Blöcke abgebildeten System an jeder Stelle des Systems das dynamische Verhalten ermittelt werden kann!

Die Realisierung des Grafiksystems erfolgte in der Programmiersprache PASCAL auf einem an einem Hostrechner VAX 11/750 arbeitenden Tektronix-Farbterminal als abstrakte grafische Turing-Maschine. Darunter ist ein abstrakter Computer zu verstehen, dessen Grundbefehle und Speicherinhalte Bilder sind, die durch einen Prozessor ähnlich wie binäre Daten verarbeitet werden. Ein Bild wird als Symbol auf einem Speicherplatz abgelegt. Befehle realisieren die Verarbeitung der Symbole. Ein Grafik-Editor erlaubt die freie Interpretation der Befehle. Die Anpassung zwischen Grafikumgebung und Applikationsprogramm übernimmt ein Befehlsprozessor, der an das Symbol einen dem während des Editiervorganges ausgewählten Zielpaket entsprechenden Mikrokode anfügt. Die Steuerung der grafischen Abläufe führt ein grafisches Betriebssystem aus. Ein Interpreterblock ermittelt aus der grafischen Information Daten und Verknüpfungen und wandelt diese in eine für den numerischen Prozeß des Zielpakets verarbeitbare Form um (und umgekehrt).

[1)] Teil 1 erschien im Heft 2/1988.

Zu den bestehenden Vorteilen des vorgestellten grafischen Systems gehört es, daß alle systemrelevanten Prozesse in grafischer Umgebung ablaufen (einschließlich Error- und Help-Funktionen). Auf diese Weise wird ein hohes Maß an interaktiver Systementwurfsfähigkeit erreicht, wobei ein breiter Einsatz durch die mögliche Einbeziehung beliebiger mathematischer Algorithmen (als Zielpaket) vorstellbar erscheint. Die leichte Anpassung des Systems an spezifische Anwenderkonfigurationen (z. B. Hinzufügen oder Weglassen von Funktionen) ohne Änderung des Gesamtsystems ist ein weiteres vorteilhaftes Merkmal des Systems.

Ein anderes Beispiel für die Schaffung grafischer Nutzeroberflächen für herkömmliche Entwurfsverfahren liefert der Beitrag von *D. Abel, H. Rake*/BRD. Es wurde die Nutzung eines Grafikeditors zur Abbildung von Petri-Netzen für den Entwurf komplexer Systeme mit gleichzeitiger Generierung der Matrizen- und Vektorbeschreibung für Simulation und Analyse vorgestellt. Die durch den Editor realisierte Syntaxanalyse ermöglicht ein interaktives Modifizieren des Netzmodells. Die abgespeicherten Netzparameter dienen in ihrer mathematischen Beschreibung (Matrix, Vektor) als Schnittstelle für implementierte Analysewerkzeuge. Im einfachsten Fall kann ein Simulator zur Berechnung von Ereignisfolgen aktiviert werden. Zur Aufdeckung von Konflikten und Deadblocks können sogenannte „Erreichbarkeitsgraphen" erstellt werden. Eine weitere Verdichtung dieser Graphen durch entsprechende Algorithmen gestattet Untersuchungen zur Lebendigkeit von Petri-Netzen. Der Nutzen der vorgestellten Lösung besteht neben den Vorteilen bei der grafischen Beschreibung komplexer Systeme (insbesondere mit parallelen Prozessen), die der Darstellung mittels Petri-Netzen inhärent sind, in der gleichzeitigen mathematischen Netzbeschreibung. Diese ermöglicht die Anwendung rechnergestützter Simulationsverfahren zur Ermittlung möglicher Strukturfehler im statischen und dynamischen Verhalten. Die Nutzung von Petri-Netzen zur Entwicklung komplexer Automatisierungssysteme ist u. a. auch Gegenstand des Beitrages von *Z. Banaszak*/VR Polen. Das auf der Basis der Petri-Netz-Modellierung gewonnene Verfahren gestattet den automatischen Entwurf deadblockfreier Steueralgorithmen für asynchrone pipeline-ähnliche parallel ablaufende Prozesse und ist damit für On-line-Anwendungen in adaptiven Systemen zur Generierung von Systemerhaltungsalgorithmen bei Komponentenausfall und vorhandener Redundanz oder Änderung/Zuführung von Prozeßschritten (flexible Fertigungszellen) geeignet.

Es ist allgemein festzustellen, daß der Anwendung von Petri-Netzen in der Automatisierungstechnik mit Sicherheit noch ein weites Feld offensteht, z. B. für verteilte Systeme. Ähnlich wie in der Informatik fehlt es jedoch gegenwärtig noch an Standardwerkzeugen, die über die grafische Erstellung und Analyse von Petri-Netzen hinausgehen.

### 12.5.1. Design and Modelling of Man-Machine-Systems

Eine besondere Rolle spielten

- das menschengerechte Gestalten der Mensch-Maschine-Beziehungen
- das menschliche Verhalten
- das Einrichten von technischen Systemen so, daß durch menschliches Fehlverhalten Havarien ausgeschlossen werden.

Im Übersichtsbeitrag von *W. B. Rouse, W. J. Cody*/USA wird die derzeitige Situation beim Entwerfen von Mensch-Maschine-Systemen als unbefriedigend gekennzeichnet. Das hat folgende Ursachen. Einerseits werden solche Systeme nach streng hierarchischen Vorgängen systemorientiert entworfen (von oben nach unten). Andererseits dominieren technologisch orientierte Entwurfspraktiken (von unten nach oben). In beiden Fällen wird oft die Rolle des Menschen nicht ausreichend beachtet. Außerdem wird festgestellt, daß Systementwerfer zwar neuartige Systeme entwerfen, sich aber schlecht in die Rolle des Bedieners versetzen können. Das Einbeziehen von erfahrenen Bedienern jedoch birgt die Gefahr in sich, daß neue Systeme nicht systemgerecht (d. h., den neuen Möglichkeiten entsprechend) entworfen werden, weil die Bediener durch ihre Erfahrungen an vorhandenen Systemen zwangsläufig auf das „Alte" fixiert sind.

Festgestellt wird ferner, daß eine zweckmäßige Methodologie für den Entwurf von Mensch-Maschine-Systemen fehlt. Dazu gibt es jedoch verschiedene Ansichten. Die Verfasser schlagen eine zweckmäßige Methodologie vor, mit der ein effektiver und kostengünstiger Entwurf erreichbar sei.

Die wesentlichsten Elemente dabei sind:

- Reorientierung beim Entwurf
- Zuwenden zur Realität des Systems.

Für das Entwerfen von Mensch-Maschine-Systemen werden darüber hinaus fünf Regeln formuliert. Dieses Vorgehen schließt ein, daß

- heute ein „Bediener" kreativ handeln können muß, d. h., daß das Bedienen eine verantwortungsvolle, schöpferische Tätigkeit auf der Grundlage von entsprechenden Fähigkeiten und Kenntnissen ist. Diese Position ist notwendig und muß herausgestellt werden, weil ein zweckmäßiges Reagieren auf unvorhersehbare Situationen notwendig ist (es kann nicht alles vorhergesehen werden).
- der Erfahrungsaustausch zwischen den verschiedenen beteiligten Berufsgruppen bzw. Spezialisten (erfahrenen Bedienern genauso wie dem „Neuen" zum Durchbruch verhelfenden Entwerfer) zielstrebig so zu suchen und auszunutzen ist, daß von jedem die förderlichen Faktoren einfließen und die hemmenden bewußt ausgeschaltet werden (also z. B. das auf das Alte orientierte Denken erfahrener Bediener und das die künftigen Situationen des Bedieners zu wenig beachtende Verhalten der auf das Neue orientierten Systementwerfer).

Der (nicht vorgetragene) Beitrag von *J. Rasmussen*/Dänemark geht von Havarieuntersuchungen aus. Danach habe sich gezeigt, daß deren Ursachen meist nicht grobe menschliche Fehler oder grobe technische Mängel sind. Vielmehr führen oft mehrere zusammentreffende kleine „normale" Mißverständnisse und Unzulänglichkeiten durch die Kombination zu schweren Havarien. Dabei sei weiter zu verzeichnen, daß die Ursachensuche meist nur auf die Bediener, das Wartungspersonal und den technischen Zustand und leider zu selten auch auf die Systementwerfer gerichtet ist, obwohl gerade solche Ursachen vor allem durch den Systementwurf verhindert werden müssen.

*Y. Nakamori*/Japan beschreibt die Entwicklung und Anwendung eines interaktiven Modellerstellungssystems.

*H. G. Stassen*/Niederlande setzt sich mit der unbefriedigenden Situation von automatisch überwachten Patienten (Körperbehinderten) und den dafür üblichen Systementwurfspraktiken aus seiner Sicht auseinander. Vieles von dem, was getan wird, werde nur aus Kostengründen (Einsparung von Menschen für die Überwachung) getan. Zukünftig müsse man den Erfordernissen derjenigen besser gerecht werden, denen durch Überwachung geholfen werden soll.

### 12.5.3. Knowledge Support in Man-Machine Systems

Eine Analyse einer Vielzahl gegenwärtig implementierter dynamischer Systeme läßt erkennen, daß die Realisierung sowohl dezentralisierter als auch hierarchisch strukturierter Automatisierungssysteme zur Erreichung angestrebter Systemparameter (z. B. Produktivität, Betriebssicherheit) zu ständig wachsenden Automatisierungsgraden führt und durch zunehmende Komplexität gekennzeichnet ist. Für Bedienung und Management solcher komplexer Systeme ist eine maximale Transparenz erforderlich, die nur durch eine „intelligente" Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen erreicht werden kann.

In einem Übersichtsbeitrag stellen *J. L. Alty*/GB und *G. Johannsen*/BRD fest, daß für den Entwurf dynamischer Systeme bisher eine technologieorientierte Vorgehensweise dominiert. Nicht zuletzt durch die nicht genügende Einbeziehung menschlicher Verhaltensweisen und Handlungen in Display-, Steuer- und Dialogtechniken treten immer wieder Defekte, Havarien und Katastrophen in hochautomatisierten Systemen auf. Die Komplexität der Systeme einerseits und die gegenwärtigen Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz andererseits, die die Nutzung wissenschaftlicher Systeme, insbesondere von Expertensystemen, gestatten, ermöglichen und erfordern einen neuen, auf den Menschen

bezogenen Entwurfsansatz. Es wird eingeschätzt, daß die Einbeziehung von Expertensystemen, die die Repräsentation von Oberflächen-Wissen durch Produktionsregel- oder Abduktionsverfahren realisieren, für viele Anwendungen der Prozeßautomatisierung ausreichend ist. Die Beschreibung kausalen Wissens, das z. B. im wissensbasierten Dialog für die Reaktion auf unvorhergesehene Situationen benötigt wird, wird gegenwärtig in Anfängen für die Nutzung in dynamischen Systemen implementiert. Als Beispiel für den neuen Entwurfsansatz wird u. a. das ESPRIT-GRADIENT-Projekt „Graphical and knowledge based dialogue for dynamic systems" der Europäischen Gemeinschaft diskutiert. Für die bessere Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen kommt dem Entwurf flexibler und strukturierter Dialogtechniken eine besondere Bedeutung zu. Je höher der Automatisierungsgrad eines Systems ist, um so verdeckter sind die tatsächlich ablaufenden Prozesse für den Bediener. Die den automatischen Steuerungen zugrunde liegenden analytischen Modelle entsprechen nicht allen vorkommenden Situationen; mathematisch begründete Eingriffe sind dem Operator schwer darstellbar. Letztlich fehlt dem Bediener, bedingt durch den zunehmenden Automatisierungsgrad, immer mehr die Möglichkeit, in Ausnahmesituationen (Havarien, Systemabweichungen) Erfahrungen zu sammeln. All diese Fakten begründen, daß der Dialog zwischen Menschen und Automatisierungssystemen sich nicht auf simple Anweisungen vom Typ IF ... THEN ... beschränken kann, sondern dem Menschen mehr das begründete WARUM? in Form von Wissen über den Prozeß als Entscheidungshilfe für Problemlösungen bereitgestellt werden muß.

Zur Realisierung des wissensbasierten Dialogs in dynamischen Systemen kommen zunehmend Strukturen aus der Computertechnik, die unter dem Begriff „User interface management system" bekannt sind, zum Einsatz. Sie realisieren eine funktionale Trennung zwischen Präsentation, Dialog, Applikation und Nutzermodell bei gleichzeitiger Zugriffsmöglichkeit aller Module auf eine gemeinsame Wissensbasis. Ein wesentliches Merkmal wissensbasierter Dialogsysteme muß die Interruptfähigkeit (system- und operatorseitig) sein, um beispielsweise Prozesse stoppen zu können oder Bedienerhandlungen zu erwarten. Das Präsentationssystem muß den Anforderungen verschiedener Nutzer (mit verschiedener Kenntnis des Systems) gerecht werden. Hier spielen der Einsatz von Farbgrafikterminals mit Mehrfachfenstertechnik, Touch-screen-Terminal, akustische Signale, Sprachein-/-ausgabe eine wachsende Rolle. Das Applikationsmodell kann aufgrund der Systemkomplexität hierarchisch strukturiert sein. Das Nutzermodell muß heuristisches, prozedurales und Faktenwissen des Operators berücksichtigen.

Die diskutierte Struktur stellt einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung wissensbasierter Dialogsysteme und damit zur Anwendung eines auf den Menschen orientierten Entwurfsverfahrens dar. Einschränkungen resultieren gegenwärtig seitens der Realisierung von Expertensystemen aus eventuellen Problemen der Verarbeitungsgeschwindigkeit und Speicherkapazität, aus dem Fehlen effektiver Werkzeuge zum Wissenserwerb und zur Überprüfung der Konsistenz der Wissensbasis. Seitens der dynamischen Systeme bestehen Probleme im Echtzeitverhalten, der Quantität der zu erfassenden Meßpunkte und der Größe der benötigten Wissensbasis.

Dem Anliegen, menschliche Intelligenz und rechentechnische Leistungsfähigkeit durch Schaffung optimierter Schnittstellen in einem geschlossenen komplexen System effektiv nutzbar zu machen, entspricht die von *Su Shi-Quan*/VR China vorgestellte Struktur eines Entscheidungsberatungssystems. Wesentliches Merkmal dieser Struktur ist die Aufteilung der Wissensverarbeitung auf ein strategisches und ein taktisches Niveau. Strategische Aufgaben wie Entscheidungsprinzipien, Problemlösungsstrategien, heuristische Entscheidungen, Schätzen und Beobachten u. a. sind dem Menschen zugeordnet. Taktische Aufgaben, wie die Ermittlung optimaler Algorithmen durch Interaktion von implementierter Wissensbasis und mathematischem Modell übernimmt der Computer. Die in microPROLOG realisierte Softwareumgebung wurde erfolgreich in einem Energieverwaltungssystem angewendet.

Über den Einsatz eines Konsultationssystems in der Stahlindustrie berichten *D. Wang* u. a./VR China. Das aus einer Shell, einem Mechanismus zur Wissenserfassung sowie einer Inferenzmaschine bestehende System wurde auf einem Personalcomputer PC/XT implementiert. Als Besonderheit des Inferenzmechanismus ist die 2-Ebenen-Optimierung zu nennen. In einer ersten Ebene werden mittels dynamischer Programmierung die Zustände der beteiligten Systemkomponenten ermittelt. In einer zweiten Phase werden die optimalen Arbeitspunkte durch nichtlineare bzw. lineare Programmierung bestimmt.

Einen interessanten Beitrag lieferten *I. P. Popchev, N. P. Zlatarova*/Bulgarische VR zu einem intelligenten problemunabhängigen Werkzeug für plausible Inferenz.

Grundlage des in muLISP für den Personalcomputer PC/XT erstellten Programmsystem ist die Anwendung von menschliche Erklärungsverfahren hinreichend modellierenden Schemata für den Inferenzmechanismus. Die somit erreichbare Nichtmonotonie der Inferenz erlaubt die Repräsentation vagen (unsicheren, unvollständigen) Wissens sowohl in deklarativer als auch prozeduraler Form.

### 14.4. Adaptive Control

Der Inhalt der in 7 Untergruppen zusammengefaßten Vorträge läßt sich in vier Rubriken einordnen:

Adaptive Steuerungsalgorithmen, Robustheit der adaptiven Steuerung, Dynamik der adaptiven Steuerung, mehrdimensionale und nichtlineare adaptive Steuerung. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf folgende Probleme gelegt:

- Beziehungen zwischen Robustheit und Genauigkeit
- Stabilität und Konvergenz adaptiver Algorithmen
- Weiterentwicklung der Adaption mit Vergleichsmodell
- Optimalität adaptiver Steuerungen
- Prädiktion bezüglich Störgrößen und Steuerungsobjekt (z. B. Berücksichtigung zeitvarianter Eigenschaften)
- Dynamik adaptiver Systeme unter Berücksichtigung von Verzögerungen und Totzeit
- digitale Systeme
- stochastische Systeme.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, daß die Vorträge auf einem hohen Niveau standen, ohne daß allerdings völlig neue theoretische Ansätze vorgestellt wurden. Die Autoren bewegten sich im wesentlichen in der „klassischen" Vorstellungswelt der adaptiven Steuerung. Beziehungen zu modernen „nichtalgebraischen" Theorien wurden nicht hergestellt. Die Autoren blieben in den meisten Fällen bei der Erläuterung der theoretischen Ergebnisse stehen, ohne praktisch realisierte Beispiele vorzustellen. Man begnügte sich mit Simulationsergebnissen.

Es ist zu erwarten, daß die adaptive Steuerung eine größere praktische Bedeutung gewinnt, wenn die Weiterentwicklung der Theorie mit den Fortschritten der Computertechnologie verbunden wird. Als Steuerungsobjekte kommen vor allem kontinuierliche Produktionsprozesse mit einer „langsamen" Dynamik in Frage (z. B. thermische Prozesse).

#### 14.5.1. Identification of Nonlinear Systems

Untersucht wurden Methoden zur Parameterschätzung nichtlinearer Systeme bei Verwendung von parametrischen und nichtparametrischen Modellansätzen und unter Annahme von Hammerstein-Strukturen. Wesentlich neue praktische Aussagen für $p$-kanonische Mehrgrößensysteme enthält der Beitrag von *M. Kortmann, H. Unbehauen*/BRD für die Verwendung der rekursiven Regression und der rekursiven Vorhersagefehler-Algorithmen. Als Nachteil muß angesehen werden, daß alle Nennerpolynome der Teilsysteme gleich sein müssen.

#### 14.5.2. Various Identification Techniques

Vorgestellt wurden verschiedene auf klassischen Algorithmen basierende Verfahren, u. a. auf Frequenzgangmessung beruhende. Neue Aspekte wurden nur im Beitrag „Recursive estimation of systems with timevarying parameters and delays" von *D. Juricic*/Jugoslawien vorgestellt. Das Verfahren besteht aus 3 Stufen:

1. Parameterschätzung vorausgewählter Teilmodelle
2. Vorhersage der Ausgänge für jedes Submodell
3. Auswahl des geeigneten Modells der Bewertungsfaktoren.

#### 14.5.3. Systems Identification Tutorials

Die Vorlesungen betrafen die Problemkomplexe:

— Schätzung der Übertragungsfunktion und der Differenzengleichung
— Methoden der Ordnungsreduktion
— Erstellung von Multimodellen
— Fehlerbetrachtungsverfahren bei verschiedenen Schätzverfahren.

#### 14.5.4. Recursive Identification Algorithm

In dieser Sitzung wurden Verbesserungen bekannter Verfahren vorgestellt. Dies betrifft:

— Rekursive ML-Schätzung durch Anwendung spezieller Filter
— Anwendung des erweiterten Kalman-Filters
— Entwurf robuster Schätzalgorithmen durch Wahl spezieller Wichtungsfaktoren.

Über den bekannten Stand hinausgehende Ergebnisse wurden im Beitrag „Optimal recurrent algorithms for identification of nonstationary plants" von Ya. *Z. Tsypkin, B. T. Poljak*/UdSSR vorgestellt. Durch die Einbeziehung eines Trendmodells in Form von Differenzengleichungen für die zeitvarianten Parameter wurde ein Algorithmus entworfen, der eine Erweiterung des Kalman-Filters für nichtnormalverteilte Störungen und nichtlineare Schätzgleichungen darstellt. Die Leistungsfähigkeit der neuen Methode wurde nachgewiesen.

#### 14.5.5. Applications of Identification

Vorgestellt wurden sehr verschiedenartige Anwendungen theoretisch bekannter Verfahren. Eine Wertung kann aufgrund der Spezifik der Anwendungsfälle nicht vorgenommen werden. Beschrieben wurden u. a. globale Modelle des Fischverhaltens in Wasserbecken, des Glasrohrzuges und die Signalanalyse meteorologischer Daten.

#### 14.5.6. Parameter and Structure Estimation

Vorgestellt wurden Methoden zur Gestaltung von Eingangssignalen für die Schätzung von AR-Modellen, Schätzung beliebiger Signalmodelle und Methoden zur Konvergenzbetrachtung der Schätzung in geschlossenen Ketten. Eine wesentliche theoretische Absicherung vieler Arbeiten zur Parameterschätzung in geschlossenen Ketten stellt der Beitrag „Instrumental variable methods for closed loop systems" (*T. Söderström*/Schweden, *P. Stoica*/Rumänien, *E. Trulsson*/Schweden) dar. Es werden Konvergenzbeweise unter Beachtung der Signalgestaltung, der Vorfilterung unter Verwendung von Mini-Max-Strategien angestellt. Die Arbeit bestimmte das theoretische Niveau der Tagung.

Insgesamt sind keine neuen theoretischen Linien zu erkennen.

### 14.6. Control Systems Design

Den Hauptschwerpunkt der 6 Sitzungen dieser Themengruppe stellte der Entwurf robuster Regelungen (10 Vorträge) dar. Mit weiteren jeweils 5 Vorträgen wurden in exemplarischer Auswahl Überblicke über die Teilgebiete

- Entwurf linearer (multivariabler) Regelungen
- Entwurf von Regelungssystemen mit Frequenzbereichsmethoden
- Entwurf von Systemen mit variabler Struktur
- Entwurf von nichtlinearen Regelungssystemen

gegeben. Die Problematik dieses Kolloquiums mit den genannten Schwerpunktsetzungen liegt in der Schwierigkeit, den Regelungssystem**entwurf** genügend von seinen jeweiligen **systemtheoretischen Grundlagen** abzuheben. Insofern können nur wenige Beiträge für sich in Anspruch nehmen, wirklich (praktisch bereits nutzbare) Methoden für den Regelungssystementwurf vorgestellt zu haben.

Hier ist der Beitrag von *J. Ackermann, R. Münch*/BRD zur Robustheitsanalyse in Abhängigkeit von 2 ungenau bekannten Systemparametern in der Parameterebene hervorzuheben, insbesondere die hierzu entwickelten sehr komfortablen und leistungsfähigen CAD-Hilfsmittel, die international Maßstäbe setzen. Die erfolgreiche Behandlung technischer Anwendungen (Verladebrücke, spurgeführter Bus) kann als gute Vergleichsbasis für andere Methoden für den Entwurf robuster Regelungen dienen. Verschiedene andere Beiträge versuchten Werkzeuge vorzuschlagen, mit deren Hilfe die Robustheit der Stabilität des Regelungssystems gegenüber Parametervariation, -unsicherheit sowie Ausfall von Elementen in der Rückführschleife analysiert werden kann. Es dominieren Methoden des Laplace-Bereiches, die bestimmte Gesetzmäßigkeiten des charakteristischen Polynoms ausnutzen. Die Nutzung für praktische Entwurfsaufgaben war nicht zu erkennen. Eine interessante Alternative zu den Frequenzbereichsmethoden stellte die von *U. Jumar, U. Korn*/DDR vorgeschlagene Strategie zur Robustheitsanalyse multivariabler Tuning-Regler dar. Zusammen mit den dazu entwickelten CAD-Hilfsmitteln hat diese Entwurfsmethode eine hohe Praxisrelevanz. Letzteres gilt auch für die von *T. N. Chang, E. J. Davison*/Kanada vorgeschlagenen Kopplungsindizes für die dezentrale Regelung bei unvollständig bekanntem System.

Von zentraler Bedeutung sowohl für die Theorie linearer Regelungssysteme als auch für deren Entwurf ist das von *G. Roppenecker*/BRD, *J. O. Reilly*/GB angegebene, in expliziter Form parametrisierte Ausgangsrückführgesetz $\boldsymbol{u = Ky}$. Es enthält $n$ freie Parameter in Gestalt der Pollagen für das geschlossene System und $m \cdot r - n$ freie Entwurfsparameter $(m + r \geq n)$.

Ein sehr interessantes Ergebnis zum Entwurf optimaler Ausgangsrückführungen stellte *U. Kuhn*/BRD vor.

Auch das von *U. Konigorski*/BRD entwickelte direkte Entwurfsverfahren für strukturbeschränkte Regler kann als sehr praktikabel — auch bezüglich des Entwurfsaufwandes — angesehen werden. Das von *B. Porter*/GB angegebene Entwurfsverfahren für quasikontinuierlich arbeitende digitale Regler ist für die Prozeßregelung interessant, da nur die Sprungantwortmatrix der Strecke benötigt wird. Verschiedene weitere Beiträge haben die seit längerem in der Fachliteratur behandelten Generalisierungen der klassischen Frequenzbereichsmethoden für den Entwurf multivariabler Systeme zum Gegenstand und enthalten theoretisch begründete punktuelle Modifikationen. Sehr wertvoll im Hinblick auf eine realistische Standortbestimmung ist dagegen der Beitrag von *I. Postlethwaite* u. a./GB, in dem eine kritische Einschätzung auf der Grundlage von Simulationsergebnissen zu industriellen Anwendungen zum sogenannten $H^{\infty}$-Entwurf (Minimierung einer speziellen Norm der ÜF-Matrix) von Regelungssystemen versucht wird. Die vorgestellten Arbeiten zu Regelungssystemen mit variabler Struktur sind als theoretisch begründete Vorschläge für spezielle Methoden zu werten, die den Entwurf dieser Systemklasse mit der Erfüllung gewisser Robustheitsanforderungen zu verbinden suchen. Aus Anwendungssicht ist der Beitrag von *R. Shoureshi, M. D. Roesler*/USA zur robusten Regelung eines Manipulators mit ungenau bekannter Dynamik von Interesse. Für eine spezielle Klasse von nur unvollständig bekannten nichtlinearen Strecken schlagen *T. Sugie, T. Ono*/Japan eine iterativ lernende Regelung vor; leider geht der Entwurf in Existenz- und Konvergenzbetrachtungen unter.

In weiteren Beiträgen wird versucht, unbekannte Dynamik nichtlinearer Strecken durch sehr spezielle Ansätze für den Reglerentwurf zu berücksichtigen. Von etwas breiterem Interesse für die Prozeßregelung ist hingegen der von *N. L. Segall* u. a./Kanada für Strecken mit Stellgrößenbegrenzung vorgeschlagene digitale Regelalgorithmus mit einer optimalen Einschrittkorrektur.

#### 15.1.1. Expert System in On-line Control

Betrachtet man gegenwärtig in Anwendung befindliche und aus einschlägigen Publikationen bekannte Expertensysteme, so wird deutlich, daß trotz einiger z. Z. noch systembedingter Schwachstellen, wie geringe Artikulationsmöglichkeiten auf natürlichem Niveau und eingeschränkte Fähigkeiten, Wissen zu erfassen, ein weites potentielles Anwendungsfeld derartiger Systeme existiert. Insbesondere im Zusammenhang mit der Bereitstellung leistungsfähiger Computer wird der Einsatz von Expertensystemen in Automatisierungssystemen zur Prozeßsteuerung mit Echtzeitanforderungen relevant.

In dem Übersichtsbeitrag von *R. L. Moore* u. a./USA wird neben der Diskussion des gegenwärtig erreichten Standes auf diesem Gebiet auf die Besonderheiten eingegangen, die sich aus Echtzeitforderungen für Expertensysteme ergeben. Zentrales Problem ist die Einführung der Zeit als Dimension in die Wissensrepräsentation, d. h., es sind geeignete Werkzeuge zur Verwaltung von temporärem Wissen notwendig, um zeitabhängige heuristische und dynamische Modelle erzeugen zu können. In einem realen System können einzelne Komponenten zeitlichen Änderungen bzw. Veränderungen unterliegen. Der Bediener muß über Werkzeuge verfügen, die es ermöglichen, die Wissensbasis zu editieren (erweitern, Modelle definieren, heuristische Regeln erstellen, Ergebnisse testen, Simulationen durchführen), ohne auf die Ebene von Programmiersprachen wie LISP oder C zurückgreifen zu müssen. Die Größe der für Echtzeitprozeßsteuerungen anfallenden Wissensbasis erfordert neue Inferenzmechanismen zur selektiven Nutzung der Wissensbasis, d. h., das Expertensystem muß in der Lage sein, Aktivitäten auf ein Gebiet oder mehrere Gebiete gleichzeitig zu fokussieren. Ein weiteres Problem besteht darin, daß sowohl der Test auf Gültigkeit von Wissen als auch die Erklärungskomponenten des Expertensystems zeitabhängiges Verhalten aufweisen müssen.

Trotz der angeführten Probleme wird eingeschätzt, daß die gegenwärtige Expertensystemtechnologie bereits eine breite Basis für den Einsatz in Echtzeitprozeßsteuerungen bietet. Gegenstand weiterer Forschungen sollten zum Beispiel Untersuchungen zur Anwendung von Ergebnissen aus der Theorie adaptiver Steuerungen für Parametertechniken zur Modellidentifikation auf Probleme des heuristischen Lernens sein. Anregungen wurden gegeben zur Verbesserung des Mensch-Maschine-Dialogs, beispielsweise durch eine abstraktere und interaktive Gestaltung der Begründung und Erklärung von Entscheidungen. Letztlich wurde vorgeschlagen, das Prinzip verteilter Systeme auch auf die Inferenzmechanismen der Expertensysteme für Echtzeitsysteme für Echtzeitprozeßsteuerungen anwendbar zu gestalten.

Weitere Beiträge enthielten im Detail interessante Informationen und bestätigen in ihrer globalen Aussage die eingangs getroffene Feststellung von der Anwendbarkeit der gegenwärtigen Expertensystemtechnologie auf Prozeßsteuerungssysteme. Bezogen auf Echtzeitanwendungen verdeutlichen sie jedoch auch deren momentane Grenzen. So stellten *M. Shibata* u. a./Japan die Anwendung eines Expertensystems zur Steuerung eines Hochofens vor. Das eigentliche Expertensystem wurde auf der Basis eines LISP-Werkzeuges erstellt. Zur Erfüllung der Echtzeitforderungen wurde eine Vorverarbeitung der Sensordaten durch den Prozeßrechner notwendig und eine zusätzliche Steuerung zur Kopplung und Funktionsteilung realisiert. Wesentliche Probleme bereitete die Reaktionszeit des Expertensystems. Letzteres Problem soll durch Unterteilung der Wissensbasis in kleinere Einheiten sowie durch die Verwendung eines speziellen KI-Prozessors gelöst werden.

### 15.1.2. Expert Systems for Diagnosis and Performance Monitoring

Die Diagnose technischer Systeme geringerer Komplexität bedient sich einer Reihe von Verfahren, z. B. bestimmter Filter- oder Parameterschätzverfahren, die in der Regel das Vorliegen eines detaillierten analytischen (numerisch verarbeitbaren) Modells voraussetzen. Für die Diagnose komplexer Prozeßsteuerungen und Automatisierungssysteme ist diese Voraussetzung oft nicht zu erfüllen. Der traditionelle Lösungsweg sieht hier den Einsatz des Menschen als Operator mit seiner Fähigkeft, erworbene Kenntnisse und Erfahrungen zur Fehlerdiagnose heranzuziehen, vor. Der damit gleichzeitig vorhandene subjektive Faktor (Leistungsschwankungen, Fehlinterpretationen, Ermüdungserscheinungen) kann natürlich auch zu Fehlverhalten führen. Die Reduzierung dieser Einflüsse kann durch Anwendung von Expertensystemen erreicht werden. Eine Vielzahl publizierter Anwendungen — z. B. DEX.C3 zur Fehlerdiagnose in Kfz-Getrieben (GMD) oder Tektronix 4004 zur Fehlersuche in elektronischen Schaltungen — bestätigen die Leistungsfähigkeit heutiger Diagnosesysteme, die, auf das betreffende Anwendungsgebiet bezogen, kaum noch von Spezialisten übertroffen wird.

In dem Beitrag zur Methodologie von Expertensystemen zur Prozeßfehlerdiagnose von *F. E. Finch, M. A. Kramer*/USA wird auf Besonderheiten hingewiesen, die aus dem Einsatz in komplexen Prozeßsystemen resultieren. Bei einer produktionsregelorientierten Wissensrepräsentation besteht die Möglichkeit, durch ein Übergewicht heuristischer Regeln die Reaktion des Diagnosesystems auf seltene Ereignisse zu sperren. Weitere Nachteile können durch eine unvollständige und inkonsistente Wissensbasis entstehen. Deshalb ist für die Prozeßdiagnose der modellorientierte Ansatz für die Entwicklung von Diagnoseregeln notwendig. Dieser muß letztlich dazu führen, daß in der Wissensbasis die relevanten strukturellen, funktionellen, kausalen und temporalen Beziehungen im Sinne von Simulationsmodellen nachgebildet werden, so daß aus dem modellierten Systemverhalten Schlußfolgerungen gezogen werden. Es wird ein hierarchisches Diagnoseverfahren beschrieben, das auf Anwendung von „Fehlerfortpflanzungsgraphen" basiert.

Bei der Anwendung von Expertensystemen in der Prozeßleistungsüberwachung steht die Forderung, den Übergang von Beraterfunktionen ausführenden Off-line-Systemen zur Systemintegration zu realisieren, d. h., Expertensysteme über Sensoren und Aktoren in den Prozeß einzukoppeln. Der Einsatz von Sensoren zur Erfassung des Prozeßzustandes führt zwangsläufig zu einer Datenvorverarbeitung, um die Wissensbasis nicht zu überlasten. Berücksichtigt man die Echtzeitforderungen, wird deutlich, daß für den Zeitraum von der Informationserfassung bis zur erwarteten Aussage kaum Zustands- oder Parameterschätzverfahren anwendbar sind.

### 15.1.3./4. Use of AI Methods in Control I and II

Von den 10 Vorträgen dieser Doppelsektion waren 4 der Einbeziehung bzw. Anwendung von Expertensystemen in den Entwurf von Steuerungssystemen und 3 der Nutzung von Methoden der Wissensverarbeitung bei der unmittelbaren Steuerung von autonomen bzw. menschgesteuerten Systemen gewidmet.

Die Bemühungen zur Anwendung von Expertensystemen für den Entwurf von Steuerungs- und Regelungssystemen haben einen recht beachtlichen Stand erreicht. So wurde von *J. H. Taylor* u. a./USA eine Expertensystemstützung für die Handhabung großer Programmpakete, wie des CLADP von Cambridge, des Lund-Paketes des Lund-Institutes, des GE-Federated Systems von *General Electric*/(GE) u. a., zur Analyse nichtlinearer Systeme und zum Reglerentwurf entwickelt, mit der das Expertenwissen zur Auswahl von Simulationsmethoden, zur Bestimmung von Gleichgewichtspunkten, zur Ableitung linearisierter Modelle, zum Entwurf von Reglern selbst, zur simulativen Validierung der Steuerung usw. verfügbar gemacht wird. Die entsprechende Regelbasis für die Modellierung nichtlinearer Systeme und den Reglerentwurf wurde mit Hilfe des Expertensystemshell „Delphi" von GE bis zu einem Expertensystem geführt, dessen weitere Vervollkommnung vorgesehen ist.

Den etwas eingeschränkten Bereich des Entwurfs robuster Regler mit Hilfe eines Expertensystems behandelten *D. R. Lewin* u. a./USA. Es liegt ebenfalls nur eine erste Version, implementiert in C bei Einbindung von numerischen FORTRAN-Routinen, vor. Auch in der BRD führten die Bemühungen zur Expertensystemstützung des Entwurfs von Steuerungssystemen zu ersten Ergebnissen, z. B. in Form eines kleinen Expertensystems zur Ableitung der Anforderungsspezifikation für die Steuerung chemischer Anlagen (*M. Brombacher*) sowie in Form eines Projektratgebers für die Softwareentwicklung von Real-Time-Systemen, der im Rahmen des PROSYT-Projektes des Bundesministeriums für Forschung und Technik der BRD mit 18 teilnehmenden Einrichtungen entwickelt wurde und vor allem der Repräsentation und Abfrage gesammelter Erfahrungen bei der Bearbeitung früherer Projekte dient.

In allen Fällen ist jedoch noch ein weiter Weg bis zur Routinenutzung in der Praxis zurückzulegen.

Interessant waren die 3 Vorträge zur Einbeziehung von KI-Techniken in autonome Regler. Das generell verfolgte Prinzip besteht in der Integration von Regelwissen über notwendige Systemstrukturänderungen des Reglers bei anormalen Betriebszuständen, das natürlich ebenfalls eine Wissensbasis für die Diagnose auftretender anormaler Zustände erforderlich macht. In verschiedenen Ausbaustufen und Reifegraden wurde diese Technik entwickelt, z. B. von *V. K. Tzouanas* u. a./USA für die Steuerung der Suspensionspolymerisation von PVC oder von *K. Liu, J. Gertler*/USA für die Ausarbeitung eines expertensystemgestützten, robusten adaptiven Regelungsschemas, wobei im ersteren Fall positive praktische Einzelerfahrungen vorliegen. Darüber hinaus wurde in der Sektion eine Reihe von Ergebnissen präsentiert, denen man nur bei gutem Willen eine Verbindung zur künstlichen Intelligenz nachsagen kann. Dazu gehörten Methoden der Fuzzy-Set-Theorie, die für die Modellierung von Vierpolen (*F. van der Rhee* u. a./ Niederlande) und multivarianten Systemen (*M. M. Gupta* u. a./ Kanada) aufbereitet wurden (der Beitrag gibt z. B. eine sehr schöne Dekomposition von multivariaten Fuzzy-Systemen in eine Menge verkoppelter eindimensionaler Fuzzy-Gleichungen an), und Ansätze zur Nutzung neuronaler Organisationsprinzipien, wie der McCulloch & Pitts-Netze zur Steuerung eines Roboterarmes mit Roboterauge auf der Basis von Transputernetzen (*F. Abbruzzese* u. a./Italien).

msr 8791 Prof. Dr. sc. techn. *U. Korn*, Leiter der DDR-Delegation zum 10. IFAC-Weltkongreß

## 11. Leipziger Automatisierungskolloquium

Am 21. Mai 1987 fand, organisiert vom Bezirksvorstand Leipzig der KDT, das 11. Leipziger Automatisierungskolloquium zum Thema „Neue Erkenntnisse zur Projektierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen" statt. Die Kolloquienreihe und das Anliegen, jeweils mehrere Vorträge zu einer ganztägigen Veranstaltung zusammenzufassen, wurden in dieser Zeitschrift schon mehrfach vorgestellt. Dieses Kolloquium wurde inhaltlich vom Lehrstuhl „Projektierung von Automatisierungsanlagen" der TH Leipzig unter Leitung von Prof. Dr. sc. techn. *R. Müller* gestaltet. Der Themenwahl lag folgende Überlegung zugrunde: Durch die Einführung verteilter Mikrorechner in die Automatisierung stieg die Leistungsfähigkeit der Automatisierungsmittel um Größenordnungen, die Leistungsfähigkeit des bedienenden Menschen verändert sich aber nur unwesentlich. Damit wird die Bedienung durch den Menschen zum funktionellen Engpaß und die Projektierung der Bedienkonzeption wird entscheidend für den Gesamteffekt.

Es wurde gezeigt, daß eine informationsflußorientierte Übersichtsdarstellung des automatisierten Prozesses eine bessere Bedienung als mit der üblichen, am technologischen Schema orientierten, stoffflußorientierten Darstellung erreicht werden kann. Weiterhin wurde dargestellt, daß für das Training der Anlagenfahrer die Arbeitsaufgaben in Elemente zerlegbar sind, die einzeln trainiert werden können. (*J. Bergmann, T. Hofmann, R. Schulze*).

Ein weiteres behandeltes Problem ist die Aufgabenzerlegung bei der Zuordnung von MSR-Stellen zu verteilten Mikrorechnern. Bei Parallelität oder Redundanz technologischer Apparate oder Prozeßstufen erreicht man Zuverlässigkeitsvorteile, wenn systematisch technologisch parallele Automatisierungsobjekte bzw. Normal- und Reserveaggregate verschiedenen Basiseinheiten zugeordnet werden.

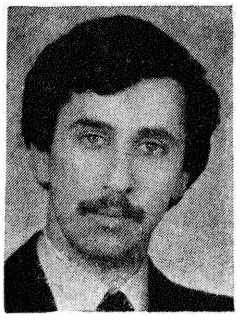
Eine wesentliche Komponente des Fortschritts der mikrorechentechnischen Automatisierungsmittel ist die Möglichkeit, während des Betriebes über Software Parameter zu ändern. Das schafft die Möglichkeit, Anlagen mit extrem unterschiedlichen Parametern bzw. Betriebszuständen automatisiert zu betreiben, z. B. Mehrproduktanlagen. Dazu bedarf es einer adäquaten Entwicklung bei den Stellgliedern. Von *W. Bettenhäuser* und *D. Telschow* wurde ein Mehrbereichsstellglied und die Konzeption des zugehörigen „intelligenten" Stellantriebes für solche Anwendungen vorgestellt. Das Kolloquium wurde durch einen Ausblick auf die Weiterentwicklung der CAD-Strategie für Binärsteuerungen, wie von *M. Strüver* inzwischen bereits im Heft 6/1987 der msr publiziert, abgeschlossen und gab damit ein Bild von der Arbeit des Lehrstuhles Projektierung der letzten Jahre.

msr 8729 *R. Müller*

## msr DISSERTATIONEN

## Dynamische Modellierung von Erdöldestillationskolonnen nach der Methode der verteilten Zustandsgrößen zur Vorbereitung des Entwurfs von Automatisierungssystemen

Die Zusammensetzungen komplexer Vielstoffgemische bei der Erdöldestillation, bestehend aus einer großen Anzahl diskreter Komponenten, werden durch kontinuierliche Funktionen eines geeignet gewählten Parameters $z$ approximiert. Als Verteilungsparameter $z$ wurde die Siedetemperatur gewählt. Auf der Basis dieser Beschreibung werden die Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichtsbeziehungen hergeleitet. Durch Linearisierung der dynamischen Bilanzgleichungen für die Stoffbilanzen auf allen Böden der Destillationskolonne erhält man ein linearisiertes System von $n + 2$ Integro-Differentialgleichungen. Im zunächst behandelten stationären Fall sind die Ableitungen nach der Zeit null, und aus dem Integro-Differentialgleichungssystem ergibt sich ein System von $n + 2$ Fredholmschen Integralgleichungen 2. Art für die Unbekannten für jeden Boden der Kolonne. Da bei den Integralgleichungen ausgeartete Integralkerne vorlagen, gelang eine exakte Lösung des Problems mit vertretbarem Rechenaufwand. Das statische Betriebsverhalten der Kolonne konnte damit für verschiedene Störfälle auch für den Fall einer von $z$ abhängigen Verdampfungsenthalpie der Gemische berechnet werden.



Zur Lösung des dynamischen Gleichungssystems wurde zunächst ein Bilanzraum betrachtet. Die resultierende Integro-Differentialgleichung wurde mittels Laplace-Transformation gelöst. Bei der Rücktransformation mußte eine Diskretisierung in $z$ vorgenommen werden. So gelang eine vollständige Lösung des Modells.

Dipl.-Ing. *Ghassan Rebboz* (32) studierte von 1974 bis 1979 „Chemical Engineering" an der Al Bath Universität in Homs in der Syrischen Arabischen Republik. Anschließend Tätigkeit als Schichtleiter in einem chemischen Betrieb. Von 1984 bis 1987 Aspirant an der Sektion Verfahrenstechnik, Wissenschaftsbereich Automatisierungstechnik, der Technischen Hochschule „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg.

Dissertation A an der Fakultät für Technische Wissenschaften und Mathematik der Technischen Hochschule „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Merseburg, 30. März 1987.

Doktorand: Dipl.-Ing. *G. Rebboz*
Vorsitzender der Prüfungskommission:
Prof. Dr. sc. techn. *S. Weiß*
Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. *G. Brack*
Prof. Dr. sc. nat. *H. Kehlen*
Prof. Dr. sc. techn. *H. Roth*

Die Dissertation kann nur über die Bibliothek der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg entliehen werden.

msr 8706 Dr.-Ing. *G. Rebboz*, Petrochemical College, P.O. 77, Homs/Syrische Arabische Republik.

## Mathematische Modellierung diskreter Steuerungsaufgaben in diskontinuierlichen verfahrenstechnischen Systemen

Die aktuelle Problematik der Automatisierung von diskontinuierlichen Anlagen erfordert wissenschaftlich fundierte Vorgehensweisen zur mathematischen Modellierung diskreter Steuerungsaufgaben. Hauptsächliche diskrete Steuerungsaufgaben sind:

- Ablaufsteuerung von Prozeßeinheiten
- Koordinierung der z. T. parallelen Abläufe von Prozeßeinheiten.

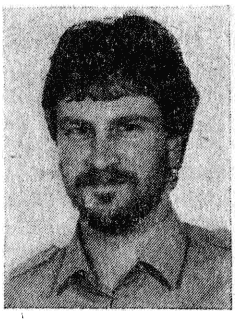
Für die Modellierung der Ablaufsteuerung einzelner Prozeßeinheiten werden modifizierte Prozeßablaufpläne verwendet. Den Schwerpunkt der Arbeit bildet die Koordinierung von Prozeßeinheiten. Die Festlegung der Koordinierungsaufgaben setzt die Analyse der Kopplungen voraus. Durch die erarbeitete technologische Interpretation von Petri-Netzen der Netzklassen

- Bedingung/Ereignis-Systeme
- Stellen/Transitionen-Netze
- Prädikat/Transitionen-Netze

lassen sich sowohl einfache als auch sehr anspruchsvolle Kopplungen modellieren.
Das Petri-Netz-Modell der Koordinierungssteuerung wird durch Verknüpfung der Teilnetze jeder Kopplung entsprechend der zu realisierenden technologischen Abläufe erstellt.
Die Synthese der Steuerung wird durch die Bestimmung formaler Eigenschaften des Netzes und deren technologische Interpretation unterstützt. In der Arbeit untersuchte und technologisch interpretierte Netzeigenschaften sind:

- Lebendigkeit
- Vorliegen von Deadlocks
- Vorliegen von Konflikten
- Gültigkeit von Fakten
- Synchronieabstand zwischen zwei Ereignissen.

Durch Simulation mit Hilfe des Petri-Netz-Modells können die Auswirkungen der Koordinierung auf die gekoppelten Prozeßeinheiten quantitativ bewertet und damit Aussagen über die Güte der Steuerung abgeleitet werden. Das Modell kann als formale Verständigungsgrundlage zwischen Verfahrenstechniker und Automatisierungstechniker bei der Realisierung einer automatischen Steuerung dienen.
Hinsichtlich der mathematischen Modellierung und Lösung diskreter Koordinierungsaufgaben in diskontinuierlichen verfahrenstechnischen Systemen existieren auch international keine vergleichbaren Ergebnisse.



Dipl.-Ing. *Hans-Michael Hanisch* (29) studierte von 1978 bis 1982 an der Technischen Hochschule „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg in der Fachrichtung Systemverfahrenstechnik. Von 1982 bis 1987 wissenschaftlicher Assistent, seit 1987 wissenschaftlicher Oberassistent im Wissenschaftsbereich Automatisierungstechnik der Sektion Verfahrenstechnik o. g. Hochschule. Verteidigung der Dissertation A an der Fakultät für Technische Wissenschaften und Mathematik der Technischen Hochschule „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg. Merseburg, 13. März 1987.

Doktorand: Dipl.-Ing. *H.-M. Hanisch*
Vorsitzender der Verfahrenskommission: Prof. Dr. sc. techn. *G. Brack*
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. *G. Gruhn*
Prof. Dr. rer. nat. *A. Helms*
Prof. Dr. sc. techn. *G. Meyer*

Die Dissertation kann nur über die Bibliothek der TH Leuna-Merseburg entliehen werden.

msr 8707 Dr.-Ing. *H.-M. Hanisch*, Technische Hochschule „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik, Otto-Nuschke-Str., Merseburg, 4200.

## Einfluß der Mikroelektronik auf Instandhaltungsprozesse von industriellen Automatisierungssystemen am Beispiel der chemischen Industrie

Die Zielorientierung ergibt sich aus der notwendigen Sicherung geforderter Verfügbarkeit automatisierter Prozesse. Als Grundlagen gelten die Minimierung notwendiger Instandhaltungsaufwendungen bei Beachtung instandhaltungsrelevanter Restriktionen. Der gewählte Untersuchungsschwerpunkt „Chemische Industrie" resultiert aus dem Vorhandensein einer großen Menge von Automatisierungsmitteln in vielfältigen Automatisierungslösungen mit breiter Altersstruktur und weiteren instandhaltungsbestimmenden Spezifika. Er schließt jedoch die Verallgemeinerung wesentlicher Aussagen nicht aus.
Die Entwicklung der Automatisierungstechnik unter dem Einfluß der Mikroelektronik und die generelle Tendenz zur Erhöhung von Automatisierungsaktivitäten initiieren den Einsatz der Automatisierungstechnik in neuen Größenordnungen. Das führt zur Erschließung neuer Anwendungsbereiche bzw. zu veränderter Wichtung bei bekannten Anwendungsbereichen. Damit verändern sich mit zunehmendem Automatisierungsgrad die Instandhaltungsprozesse allgemein und die Instandhaltung der Automatisierungstechnik im besonderen immer mehr von einem Hilfsprozeß zu einem direkt produktionsbeeinflussenden Prozeß.
Die Dissertation prognostiziert eine zunehmende Verzahnung von Automatik und Informatik zu einer aufeinander abgestimmten Informationswandlungstechnik. Es wird der Nachweis angetreten, daß mit dieser Entwicklung in der Instandhaltung der Automatisierungstechnik Sachzwänge entstehen, d. h., die vorhandene Instandhaltungsleistung bestimmt als Restriktion den möglichen Umfang der Automatisierungstechnik. Sie kann ohne gezielte Gegensteuerung mögliche Effekte der Automatisierung durch den Fakt der Nichtinstandhaltbarkeit gefährden. Das erfordert auch eine betrieblich zentralisierte Instandhaltung der Automatisierungstechnik.
Ausgelöst vom Einsatz der Automatisierungsmittel mit Mikrorechentechnik entsteht das Instandhaltungsobjekt Software mit spezifischen Gebrauchseigenschaften und Instandhaltungsforderungen. Dabei basiert fundierte Instandhaltungstätigkeit auf geeigneten Modellvorstellungen zur Schadens-/Fehlerentstehung.
Als Voraussetzung detaillierter Vorbereitung und Durchführung der Instandhaltungsprozesse steht die entwickelte Leistungsstruktur zur Instandhaltung moderner Automatisierungsmittel mit integrierter Mikrorechentechnik zur Verfügung. Sie enthält u. a. auch automatisierte Instandhaltungsmaßnahmen, die systematische Schwachstellenbekämpfung und Modernisierungsaktivitäten. Die Hierarchie der Instandhaltungsobjekte abstrahiert von speziellen Lösungen und bietet eine instandhaltungsrelevante Arbeitsgrundlage zur hardware- und softwarebezogenen Klassifizierung und Detaillierung moderner Automatisierungstechnik.

(Fortsetzung auf Seite 139)

Dipl.-Ing. oec., Ing. *Rolf Werner* (51) studierte von 1953 bis 1956 an der Ingenieurschule für Feinmechanik und Optik in Jena. Von 1971 bis 1976 schloß sich ein Fernstudium an der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg mit dem Abschluß Dipl.-Ing. oec. an. 1979 folgte der Abschluß des Postgradualstudiums an der TH „Otto von Guericke" Magdeburg als Fachingenieur für Informationsverarbeitung. Auf dem Fachgebiet BMSR-Technik war er zunächst Konstruktions- und Projektingenieur und entwickelte sich zum Leiter der Instandhaltung der Automatisierungstechnik im VEB Filmfabrik Wolfen. Von 1981 bis 1986 führte er eine außerplanmäßige wissenschaftliche Aspirantur an der Sektion Automatisierungsanlagen der TH Leipzig durch.

Doktorand: Dipl.-Ing. oec., Ing. *R. Werner*
Vorsitzender der Verfahrenskommission: Prof. Dr. sc. techn. *H.-G. Woschni*
Gutachter: Prof. Dr. sc. phil. *W. Kriesel*
Prof. Dr. sc. techn. *G.-W. Werner*
Dr.-Ing. *W. Keddi*

Die Dissertation kann nur über die Hochschulbibliothek der Technischen Hochschule Leipzig ausgeliehen werden.

Dr.-Ing. *R. Werner*, VEB Filmfabrik Wolfen, Fachdirektorat Technik, Abt. Automatisierungs- und Meßtechnik, Wolfen, 4440. msr 8647

**Aufgabenstellung und Entwurf von Binärsteuerungen.** Band 222 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Von *J. Alder*. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 72 Seiten, 38 Bilder, 3 Tafeln, 4,80 M. Bestell-Nr.: 553598 1

Der rechnergestützte Entwurf und die rechnergestützte Programmierung von Binärsteuerungen gewinnen immer größere Bedeutung und sollen Beschreibungsmittel wie Logikplan, Funktionsplan, Kontaktplan oder Anweisungsliste für umfangreiche Steuerungen ergänzen. Gegenstand dieses Buches ist daher die Darstellung einer Methode zur Ausarbeitung einer rechnergestützten Aufgabenstellung für die Automatisierung eines binär zu steuernden Prozesses durch die praktikable Anwendung eines Prozeßablaufplanes (Weiterentwicklung des Programmablaufgraphen nach *Killenberg*). Der Prozeßablaufplan soll hierbei ein Prozeßmodell mit der Einordnung der Mensch-Maschine-Kommunikation darstellen und beinhaltet als Lösung alle funktionellen Beziehungen, auch der Prozeßsicherung zwischen dem Prozeßeingang und -ausgang, die die zu projektierende Binärsteuerung zu realisieren hat.
Der Autor löst diese Aufgabe vorbildlich und beschreibt die Arbeitsmethode in der Reihenfolge

- mathematische Grundlage mit der Aufteilung in Teilprozesse und deren Steuerrelationen bis hin zum Aufstellen des Prozeßablaufplanes und des Steuerungsablaufplanes
- Anweisungen zum Aufstellen der Prozeßzerlegungsgraphen und des Prozeßablaufplanes sowie Einordnung in MSR-Stellen des technologischen Schemas und MSR-Stellenliste „Steuerung"
- Anwendung der Methode beim verfahrenstechnischen Prozeß „Harnstoffanlage" von der Formulierung der Aufgabenstellung über den Entwurf des Prozeßablaufplanes bis hin zum Ausfüllen der MSR-Listen und der Umwandlung in einen Steuerungsablaufplan.

Die vorgestellte Arbeitsmethode der binären Prozeßanalyse stellt ein mögliches neues Beschreibungsmittel dar, das sowohl dem Prozeßtechnologen als auch dem Steuerungsprojektanten zum Vorteil gereichen und zur Verständigung dienen kann. Es wurde bewußt an das übliche Vorgehen der MSR-Projektanten angepaßt, wendet die gültigen Standards TGL 14091 und TGL 33247 konsequent an und gibt Empfehlungen zu deren Weiterentwicklung. Es kann eingeschätzt werden, daß durch die neue Form der Ausarbeitung der Aufgabenstellung der Steuerungsprojektant einen wesentlich fehlerärmeren Entwurf der Schaltung oder des Steuerrechnerprogramms erstellen kann, ohne seine bisherigen Arbeitsmethoden grundsätzlich zu verändern, und es ist der erste Teil einer durchgängigen Arbeitsmethode der rationellen Projektierung von der Technologie bis zur Inbetriebnahme von Binärsteuerungen. B 2294 *H. Kloust*

**Prozeßsteuerung in der Teilefertigung.** Band 227 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Von *G. Neef* und *R. Piegert*. Berlin: VEB Verlag Technik 1987. 80 Seiten, 43 Bilder, 4,80 M.
Bestell-Nr.: 553 756 5

Dieser Band soll, wie die Autoren im Vorwort erklären, dem Maschinenbauer, dem Fertigungstechniker oder Konstrukteur sowie dem Elektroniker, Informatiker und Steuerungstechniker gleichermaßen Grundlagen vermitteln und Anregungen bei der gemeinsamen Arbeit zur Durchsetzung der automatischen Produktion geben. Dieses Ziel ist bei knapp 80 Seiten Umfang wohl zu hoch gesteckt, zumal der angesprochene Kreis von Fachleuten von sehr unterschiedlichen Startpositionen an die Problematik herangehen dürfte. Dieses Buch ist aus der Sicht des Maschinenbauers und Fertigungstechnologen geschrieben. Es werden die grundsätzlichen Möglichkeiten der Aufgabenbewältigung der Teilefertigung bei automatisiertem Betrieb beschrieben und die wesentliche Begriffswelt dargestellt.
Behandelt werden: Entwicklungsrichtungen flexibler Fertigungssysteme, Steuerung flexibler Fertigungssysteme, Modellierung der Steuerung für flexible Fertigungssysteme, Implementierung von Steuerungen für flexible Fertigungssysteme, Tendenzen.
Diese Abschnitte beschreiben in verbaler Form Begriffe, Aufgaben und Strategien sowie anhand von Strichbildern Strukturvarianten möglicher Datenflüsse. Der Wert dieser Darstellungen liegt wohl mehr in der vorgenommenen Auflistung der Problemkreise und deren Zusammenhänge.
Der Steuerungstechniker vermißt hierbei eine Reihe eingeführter Methoden und Techniken seiner Fachdisziplin, angewandt auf die speziellen Probleme der Fertigungsautomatisierung. So erfassen die Abschnitte, die sich mit der Modellierung und der Implementierung auseinandersetzen, nur sehr einseitig die Problematik und bleiben unvollständig. Die im Buch gewählte Darstellungsform genügt den Ansprüchen zur Vermittlung eines allgemeinen Überblicks. Dieses Buch macht überdies sehr deutlich, wie wichtig es ist, die Zusammenarbeit aller an CAD/CAM-Projekten beteiligten Fachdisziplinen zu entwickeln, um die übergreifenden Schnittstellen bestmöglich zu beherrschen. B 2296 *W. Fritzsch*

**Graphen, Algorithmen, Programme.** Von *H. Walther* und *G. Nägler*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1987. 192 Seiten, 70 Bilder, 22,— M.

Das Werk wurde als Lehrbuch konzipiert, das sich vor allem an Studierende von Fach- und Hochschulen technischer, naturwissenschaftlicher und ökonomischer Fachrichtungen wendet. Aber auch bereits im Berufsleben Stehende, die sich für Grundprobleme der Modellierung und der Strukturanalyse von diskreten Systemen interessieren, können aus diesem Lehrbuch großen Nutzen ziehen.
In einem einführenden Kapitel wird auf verschiedene Möglichkeiten der Beschreibung und Speicherung von Graphen eingegangen. Außerdem werden wesentliche Zusammenhänge zwischen Algorithmen, Programmablaufplänen und Rechenprogrammen erläutert, und zwar anhand einfacher Organisationsaufgaben, auf die in späteren Teilen des Buches immer wieder zurückgegriffen wird. Die Autoren haben sich das Ziel gesetzt, alle vorgestellten Algorithmen als Programme in der Programmiersprache PASCAL zu formulieren. Um Lesern, die diese Sprache noch nicht kennen, den Einstieg zu erleichtern, werden in den ersten beiden Kapiteln die Algorithmen in dreifacher Stufung vorgestellt:

1. Verbalalgorithmus zur Darstellung der Grundidee
2. befehlsmäßiger Algorithmus in einer pascal-ähnlichen Sprache (mit deutschen Schlüsselwörtern)
3. PASCAL-procedure.

(Fortsetzung von Seite 138)

Mit der Nutzung instandhaltungsrelevanter Gebrauchseigenschaften von Automatisierungsgeräten und -systemen verfügt die Instandhaltung über ein Arbeitsmittel der Bewertung. Es ermöglicht die Bestimmung des technischen Niveaus von Automatisierungsmitteln, auch im Rahmen der Mitwirkungspflicht zur Entwicklung neuer Baueinheiten.
Die Arbeit zeigt grundsätzliche Möglichkeiten und Voraussetzungen zur Entwicklung der planmäßigen Instandhaltung unter weitgehender Nutzung von klassifizierenden Übersichten bzw. von Beispiellösungen. Die generelle Aufwertung der Instandhaltung für die Schlüsseltechnologie Automatisierungstechnik wird postuliert.

Im dritten und vierten Kapitel wird der befehlsmäßige Algorithmus als Zwischenschritt weggelassen.
Das Kapitel 2 ist Abstandsproblemen gewidmet. Es werden Algorithmen zur Berechnung der Erreichbarkeit, von Wurzelbäumen und Minimalgerüsten, von stark zusammenhängenden Komponenten, von kürzesten und von längsten Wegen, von Radius und Zentrum angegeben. Ferner wird auf das Steiner-Problem eingegangen.
Im Kapitel 3 werden Strom- und Transportaufgaben behandelt:
Berechnung elektrischer Netzwerke, Maximalstrom-, Zirkulations-, Zuordnungs- und Rundreiseproblem.
Im Kapitel 4 werden Algorithmen zur Berechnung der inneren Stabilitätszahl und der chromatischen Zahl angegeben sowie Sätze über maximale Paarungen und über die Planarität von Graphen diskutiert.
Durch eine Fülle von Beispielen wird das Verständnis erleichtert und dem Leser der anschauliche Apparat der Graphentheorie nahegebracht. Auf mathematischen Formalismus und abstrakte Symbolik wurde bewußt verzichtet. Dem inhaltsreichen Buch ist eine weite Verbreitung zu wünschen.

B 2277 *K. Reinschke*

**Angewandte Methoden der statistischen Modellierung.** Von *A. S. Salygin* und *Ju. I. Palagin*, Leningrad: Mašinostroenie 1986. 320 Seiten, 61 Bilder, 43 Tafeln.

Gegenwärtig wächst die Bedeutung der Modellierung komplizierter Systeme in allen Bereichen von Wissenschaft und Technik, wobei in allen Untersuchungsetappen die Analyse und Synthese mathematischer Modelle erforderlich ist.
Einen wichtigen Platz nehmen dabei nach wie vor statistische Methoden der Modellbildung ein, insbesondere bei der Modellierung von stochastischen Größen, Prozessen und Feldern. Das Buch widmet sich gerade dieser Aufgabe, wobei Methoden der Stichprobenschätzung von Kenngrößen stochastischer Prozesse und Felder behandelt werden, einschließlich der Genauigkeitsabschätzung und der Entwicklung von Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit. Diese Aufgaben sind nur mit leistungsfähiger Rechentechnik zu realisieren. Dementsprechend sind die Autoren bemüht, für alle Verfahren rekursive Algorithmen, die besonders für die Echtzeitverarbeitung geeignet sind, zu entwickeln.
Neben bekannten Verfahren enthält die Publikation eigene Forschungsergebnisse insbesondere zur Analyse der Genauigkeit der Schätzung von Kenngrößen stationärer Prozesse, zur Fehlerabschätzung von Korrelations- und Spektraldichtefunktionen. Behandelt werden auch effektive Schätzungen von Erwartungswerten und Dispersion sowie mehrdimensionaler Verteilungen mit Hilfe adaptiver Algorithmen.
Insbesondere die Modellierung stochastischer Felder bereichert die Theorie und Praxis der statistischen Modellierung, wobei von besonderer Bedeutung die Lösung der Rechenzeitprobleme ist. Hier kommt der Entwicklung von Rechenzeit sparenden Algorithmen zur Modellierung Gaußscher und nichtgaußscher, skalarer und vektorieller Felder große Bedeutung zu.

B 2306 *J. Peters*

**Solving Least Squares Problems.** Von *Ch. L. Lawson* und *R. J. Hanson*. Moskau: Nauka 1986. 230 Seiten, 17 Bilder, 6 Tafeln.

Das Buch dient als Lehrbuch und Nachschlagewerk zur Lösung von linearen Aufgaben der Theorie der kleinsten Quadrate. Diese Aufgabe trifft man häufig als selbständige Aufgabe oder als Teilaufgabe einer umfangreicheren Problemstellung an.
Gegeben ist eine $(m \times n)$-dimensionale Matrix $\boldsymbol{A}$ reeller Zahlen vom Rang $k \leqq \min(m, n)$ und ein $m$-dimensionaler Vektor $\boldsymbol{b}$ reeller Zahlen. Gesucht ist ein $n$-dimensionaler Vektor $\boldsymbol{x}_0$ reeller Zahlen, der die euklidische Länge des Vektors $\boldsymbol{Ax} - \boldsymbol{b}$ minimiert. Dazu kommen vielfach in praktischen Aufgabenstellungen Nebenbedingungen in Form von Gleichungen oder Ungleichungen in den Variablen, Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Elemente der Matrizen (dabei wird eine grobe, d. h. gegenüber kleinen Störungen unempfindliche Lösung gesucht) u. a. Vielfach reicht darüberhinaus der Speicherumfang der Rechenanlage für praktische Zwecke nicht aus. Für alle diese Problemstellungen werden Lösungen angeboten. Die im Original enthaltenen programmtechnischen Lösungen in FORTRAN wurden jedoch in der sowjetischen Ausgabe, die 12 Jahre nach Erscheinen des Originals an Aktualität nichts verloren hat, weggelassen, da gegenwärtig in den verfügbaren Programmpaketen eine Vielzahl von Lösungen enthalten ist.

B 2309 *J.-A. Müller*

**Regelungen — Analyse und technischer Entwurf.** Band 3: Rechnerische Lösungen zu industriellen Aufgabenstellungen. Von *A. Weinmann*. Wien/New York: Springer-Verlag 1986. 247 Seiten, 103 Bilder.

Die theoretischen Grundlagen der Regelungstechnik sind durch einen hohen Abstraktionsgrad gekennzeichnet, der ein schnelles Eindringen und Beherrschen von Methoden und Verfahren erschwert. Dies ist jedoch Voraussetzung für das Erkennen regelungstechnischer Aufgabenstellungen, für ihre geeignete Formulierung und die sinnvolle Auswahl effektiver Lösungsverfahren.
Diesem Anliegen dient die Reihe: Regelungen — Analyse und technischer Entwurf, deren 3. Band sich mit rechnerischen Lösungen zu industriellen Anwendungen befaßt. Die beiden vorangegangenen Bände verfolgten das Ziel, aus der Vielzahl regelungstechnischer Verfahren und Theorien eine Auswahl zu treffen, die der Häufigkeit und Relevanz industrieller Anwendungen entspricht und somit eine geeignete regelungstechnische Basis darstellen. Der 3. Band dient dem Vertiefen der Theorien anhand konkreter Anwendungsfälle, so daß damit ein wesentlicher Beitrag zum Verständnis der theoretischen Grundlagen geleistet wird.
Die Auswahl der 39 Anwendungsfälle, die einen sehr breiten technischen Bereich überstreichen, erfolgte so, daß ihre Lösungen auch ohne umfangreiche Rechnerhilfs- und Simulationsmittel nachvollzogen werden können, wobei durch gezielte Verweise auf die beiden vorangegangenen Bände sehr schnell die theoretischen Grundlagen nachgelesen werden können.
Es ist dem Verfasser in dankenswerter Weise gelungen, industrielle Aufgaben, die nur in den seltensten Fällen in ihrem vollen Umfang in einem solchen Buch dargestellt werden können, so abzurüsten bzw. aufzubereiten, daß zwischen Schwierigkeitsgrad, Umfang und Transparenz ein guter Kompromiß gefunden wurde, der es dem Leser anhand der im wesentlichen durchgerechneten Lösungswege gestattet, seine Kenntnisse zu überprüfen und ein bestimmtes „Ergebnisgefühl" zu erlangen. Die sinnvoll ausgewählten Beispiele, die Entwurfsfragen bei Ein- und Mehrgrößenregelungen, Zustandsregelungen, Optimalsteuerungen, Fragen der Identifikation, den stochastischen Entwurf einschließlich Kalman-Filter und nichtlineare Regelungen behandeln, bieten dem in der Praxis tätigen Ingenieur und Forscher sowie Studenten höherer Semester entsprechender Fachrichtungen eine Fülle von Aufgabenstellungen mit durchgerechneten Lösungsvorschlägen.

B 2188 *J. Sponer*

**Elektrische Leistungsmessung.** Messung von Energie und Leistung, Stand der Technik, Trends. Von *W. Wehrmann*, *H. Leidersitz*, *B. Nowak*, *S. Tumfart* und *H.-J. Wehner*. Sindelfingen: expert verlag GmbH. 130 Seiten.

Dem vorgelegten Buch ist, wie man dem Vorwort entnimmt, eine lehrgangsbegleitende Funktion bei der beruflichen Weiterbildung zugedacht. Die postulierte Erwartungshaltung des Benutzers nach wissenschaftlich-technischer Gründlichkeit und praktischer Verwertbarkeit wird nicht enttäuscht — wohl aber vermißt der Rezensent jegliche Spur einer (sprachlichen) Lektorierung. Wohl an die Dutzende „eingesparter" Kommata, unvollständige Sätze und Slangaus-

drücke („Hier konnten ... die vielen Meßreihen rasch durchgezogen werden.") schaffen unnötig Raum für Zweifel an hinreichend gründlicher Arbeit von Autoren und Herausgeber.
Sieht man von diesen Mißlichkeiten ab, findet man eine umfassende Darstellung aller Leistungskenngrößen im Zeit- und Frequenzbereich einschließlich korrelativer Kenngrößen (1. Kapitel), eine relativ ausführliche Beschreibung des IEC-Busses und seiner Nutzung beim Einsatz digitaler Meßgeräte (2. Kapitel) und die Darstellung elektronischer Multiplikatoren und Koppelglieder für die Leistungsmessung. In diesem 3. Kapitel dominiert verständlicherweise der Time-Division-Multiplizierer. Zwei abschließende Kapitel enthalten praktische Beispiele für Leistungsmessungen mit elektromechanischen und elektronischen Geräten einschließlich von Grenzgebieten wie nichtsinusförmige Größen, kleiner Leistungsfaktor oder wärmetechnische Fragestellungen.
Der Stand der Technik wird, dem Untertitel gemäß, gut wiedergegeben; Trendaussagen gehen nicht darüber hinaus.

B 2189 *W. Richter*

**Numerische Mathematik.** 40 BASIC-Programme. Von *D. Herrmann*. 2., durchgesehene Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. 141 Seiten.

Home- und Personalcomputer ermöglichen die Ausführung von umfangreicheren numerischen Berechnungen direkt am Arbeitsplatz. Mit einer mathematischen Ausbildung und Programmierkenntnissen ist man jedoch noch nicht in der Lage, gute numerische Programme zu entwickeln. Bei vielen Problemen besteht die Gefahr der numerischen Instabilität. In diesem Buch werden 40 BASIC-Programme zur Lösung wichtiger numerischer Probleme vorgestellt. Die Programme gehören zu den Gebieten: Funktionsentwicklung (*Fourier*, *Tschebyschew*), Lösung nichtlinearer Gleichungen und linearer Gleichungssysteme, Fehler- und Ausgleichsrechnung, Interpolation, numerische Differentiation und Integration, Berechnung von Eigenwerten/Eigenvektoren von Matrizen, Lösung von gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen. Nach jeweils einer knappen durch Struktogramme unterstützten Erläuterung zum Problem, die einige mathematische Kenntnisse voraussetzt, werden die Programmausdrucke wiedergegeben. Die Programme vermeiden die Verwendung von rechnerspezifischen Befehlen, so daß sie auf den meisten BASIC-Rechnern in dieser Form verwendbar sind. Jedes Programm wird durch ein numerisches Beispiel ergänzt. Soweit möglich werden Verfahrensfehlerabschätzungen in die Erläuterungen einbezogen und an den Beispielen überprüft. Es werden neuere und effektive Verfahren eingesetzt, wie die Matrizeninversion nach *Bauer*, lineare Ausgleichsrechnung mit Schmidt-Orthogonalisierung für schlecht konditionierte Matrizen, Spline- und rationale Interpolation, Integration nach *Bulirsch/Stoer*, Eigenwertbestimmung mit dem QR-Verfahren nach *Francis*, Integration von Differentialgleichungen durch Extrapolation nach *Gragg/Stoer*.
Das Buch will und kann ein Lehrbuch oder Grundlagenwerk der numerischen Mathematik nicht ersetzen. (Eine geeignete Zusammenstellung findet sich im Literaturverzeichnis.) Es ist jedoch eine wertvolle Unterstützung bei der Verfahrensauswahl, die nicht unkritisch erfolgen darf, und ist in diesem Sinn den Anwendern numerischer Verfahren der genannten Gebiete zu empfehlen.

B 2313 *J. Wede*

**Wissensbasierte Systeme.** GI-Kongreß 1985. Herausgeber: *W. Brauer* und *B. Radig*. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo: Springer-Verlag. 402 Seiten.

Die Grundlage wissensbasierter Systeme bilden die Formalisierung und die rechentechnische Realisierung von Schlußfolgerungsabläufen, durch die aus einer Vielzahl von Einzelinformationen und Kenntnissen über deren gegenseitige Verknüpfungen (Wissen) neue Aussagen abgeleitet werden können. Forschungsaufgaben auf diesem Gebiet der künstlichen Intelligenz sind darauf gerichtet, Wissenserwerb, Wissensdarstellung und Wissensverarbeitung rechnergestützt auszuführen. Der internationale Kongreß der Gesellschaft für Informatik e. V., München 1985, hatte das Ziel, Methoden, Anwendungen und Perspektiven wissensbasierter Systeme zu zeigen. Die im Tagungsband erschienenen 29 Vorträge haben etwa zu einem Drittel methodische und zu zwei Dritteln Anwendungsprobleme und fertiggestellte Systeme zum Inhalt. Die mehr theoretisch orientierten Arbeiten befassen sich mit Datenbanken und deren Weiterentwicklung mittels Methoden der Wissensverarbeitung, Formen der Wissensrepräsentation unter verschiedenen praktischen Randbedingungen sowie mit allgemeinen Problemen des kommerziellen Einsatzes wissensbasierter Systeme. Die Anwendungsstudien berichten über eine breite Palette von Rahmensystemen für Expertensysteme, Konzeptionen für wissensbasierte Systeme in spezifischen Anwendungsgebieten sowie erste Einsatzerfahrungen.
Die Vielfältigkeit der angesprochenen Themen sowie der vorgeschlagenen Lösungen spiegeln die rasche Entwicklung und kommerzielle Ausrichtung der Forschungsarbeiten zu wissensbasierten Systemen wider. Für Automatisierungstechniker sind neben allgemeinen Trendaussagen zwei Vorträge über Computersehen (*Nagel*: Wissensgestützter Ansatz beim maschinellen Sehen — Helfen sie in der Praxis?; *Riseman/Hanson*: A methodology of the development of general knowledge based vision systems.), eine Konzeption zum Einsatz wissensbasierter Systeme in der Prozeßautomatisierung (*Wittig*: Expertensysteme in der Prozeßleittechnik) sowie ein Beitrag zum Einsatz wissensbasierter Systeme in der Elektroindustrie (*Pasedach*: Wissensbasierte Systeme als Bestandteile von Produkten und Systemen in der Elektro-Industrie) von besonderem Interesse.

B 2207 *J. Lunze*

**Hardware-Erweiterungen für den ZX 81.** Von *O. Merker*. Franzis-Verlag GmbH. 199 Seiten.

Der Einsatz von Heimcomputern beschränkt sich im Regelfall auf die Kommunikation mit dem Rechner über Bildschirm und Tastatur. Der engagierte Amateur — und dieser ist hier angesprochen — ist jedoch an einer umfassenderen Nutzung seines Rechners für Meß-, Steuer- und Regelaufgaben interessiert. In überzeugender Weise wird in diesem Buch gezeigt, wie ein Rechner vom Typ ZX 81, der zu den kleinsten und billigsten zu zählen ist, zur Lösung solcher Aufgaben eingesetzt werden kann. Der Bogen der Darstellung spannt sich von einer knappen Erläuterung von Struktur und Besonderheiten des ZX 81 über die Hardware-Erweiterungen, die zugehörige Software bis zu exemplarischen Anwendungen. In zwei Versionen mit unterschiedlichem Leistungsumfang werden Erweiterungsgrundbausteine zur Busentkopplung, Speichererweiterung und Adressendekodierung zum Anschluß von weiteren Funktionsplatinen beschrieben. Hier wie bei allen weiteren Baugruppen sind Leiterplatten-Layouts (Zweiebenen), Bestückungspläne und zugehörige Stücklisten angegeben. Eine breite Palette von Funktionseinheiten, wie digitale Ein-/Ausgabekarten (u. a. auch ein Triac-Leistungsschalter-Interface für Netzsteuerung), analoge Ein-/Ausgabekarten (RD-Wandler, AD-, DA-Wandler), Dekodierer für Zeitzeichensender DCF 77, rechnergesteuerte Oszillatoren zur Tonerzeugung, Pseudo-ROM (batteriegepufferter CMOS-RAM), bildet die Voraussetzung für zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. Softwarelösungen und -anregungen u. a. zur Einbeziehung der Druckersteuerung eines systemfremden Druckers, Tastaturumkodierung, selbstdefinierte Befehle, Tonerzeugung, Modellbahnsteuerung, Temperaturmessung, Erzeugung von Spannungsverläufen, Funktionseingabe durch Grafiktablett, Ausmessen von elektronischen Bauelementen runden das Bild ab.
Etwas bedauerlich ist, daß von den Z-80-Peripheriebausteinen kein Gebrauch gemacht wurde.
Trotzdem ist dieses Buch für jeden ZX-81-Besitzer (und darüber hinaus) eine äußerst lohnende Lektüre, die zur kreativen Hard- und Softwarearbeit anregt.

B 2325 *J. Wede*

# KURZFASSUNGEN

*Badelt, W.; Hauser, S.; Pillat, P.:*

**Parameterschätzung bei aktiver und/oder passiver Experimentation unter Nutzung von Analog- und Digitalrechentechnik**

msr, Berlin 31 (1988) 3, S. 98–101

Einfache Parameterschätzverfahren, die auf der Einbeziehung des Operateurs in den Identifikationsalgorithmus beruhen, werden durch die Kopplung von Analog- und Mikrorechentechnik praktikabel. Im Beitrag werden Geräte- und Programmtechnik sowie ihre Anwendung an einem Beispiel beschrieben.

*Groll, O.:*

**Rechnergestützte Optimierung der Arbeitsweise einer Brotteigteil- und Wirkmaschine unter automatisierungstechnischen Aspekten**

msr 31 (1988) 3, S. 101–105

Bei der Automatisierung traditioneller technologischer Verfahren ergeben sich für den Automatisierungsingenieur immer dann Probleme, wenn bei der Konzipierung dieser Verfahren steuerungstechnische Aspekte nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden. An einem ausgewählten Beispiel, einer Brotteigteil- und Wirkmaschine, wird gezeigt, daß der Automatisierungsingenieur in der Lage sein muß, fundierte technologische Änderungen vorzuschlagen, um das Verfahren überhaupt bzw. mit ökonomisch vertretbarem steuerungstechnischem Aufwand zu automatisieren.

*Geitner, G.-H.; Krug, G.:*

**Zur Anwendung des Betragsoptimums für digital geregelte Gleichstromantriebe**

msr, Berlin 31 (1988) 3, S. 105–111

Die für das Betragsoptimum bei digitalen Reglern bekannten Beziehungen zur Führungsoptimierung werden in einer übersichtlichen geschlossenen Darstellung angegeben. Eine Erläuterung der Anwendung erfolgt anhand von Regelkreismodellen und Regleroptimierungen für elektrische Antriebe mit Gleichstrommotoren.

*Brack, G.; Clemens, F.:*

**Zur Lösung der dynamischen Zustandsgleichungen mit substantiell verteilten Zustandsgrößen**

msr, Berlin 31 (1988) 3, S. 111–115

In der dynamischen Zustandsgleichung mit substantiell verteilter Zustandsgröße $q(z, t)$ hängt diese von der Zeit $t$ sowie einem unabhängigen Verteilungsparameter $z$ ab, und auf der rechten Seite der Gleichung tritt ein Integralausdruck über $q(z, t)$ auf. Für einen ausgearteten Kern dieses Integrals wird die Gleichung gelöst, und zwar sowohl für kontinuierliche als auch diskretisierte Zeitkoordinate.

*Scholz, A.; Schulz, G.:*

**Strukturelle Analyse von Mehrgrößensystemen als Vorstufe der Berechnung strukturbeschränkter Regler**

msr, Berlin 31 (1988) 3, S. 115–119

Es wird eine einfache Möglichkeit der Zerlegung eines Mehrgrößensystems in einseitig gekoppelte Teilsysteme vorgestellt. Zur Überprüfung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit dieser Teilsysteme wird ein Algorithmus zur strukturellen Rangbestimmung behandelt. Beide Algorithmen basieren auf graphentheoretischen Erkenntnissen. An einem praktischen Beispiel wird gezeigt, wie mit strukturellen Voruntersuchungen der Aufwand für die Reglerberechnung reduziert werden kann.

*Woschni, E.-G.:*

**Konsequenzen einer Erhöhung der Verarbeitungsbreite von Mikrorechnern beim On-line-Einsatz**

msr, Berlin 31 (1988) 3, S. 119–121

Mit dem Übergang zu höheren Verarbeitungsbreiten sind bei On-line-Verarbeitung neben den Quantisierungs- und Rundungsfehlern auch Fehler infolge eines nicht idealen Programms und infolge der begrenzten Anzahl der Abtastwerte, Cut-off- und Aliasing-Fehler, wie im Beitrag in ihrer gegenseitigen Verflechtung untersucht, zu verringern. Als Schlußfolgerung ergibt sich u. a., daß für dynamische Probleme mit hoher Grenzfrequenz Prozessoren mit geringerer Verarbeitungsbreite heute oft eine günstigere Lösung darstellen.

*Barth, W.; Müller, K.-J.; Reichel, F.; Zeun, G.:*

**Robotersteuerung IRS 713**

msr, Berlin 31 (1988) 3, S. 121–125

Im Beitrag wird die Beschickungsrobotersteuerung IRS 713 vorgestellt. Nach Erläuterung des konstruktiven Aufbaus und der Peripherie folgt eine Darstellung der Struktur des 4-Rechner-Systems sowie des Hardwareinhaltes und der Funktion der Einzelmodule, wie Lageregelungskomplex und Bedienteil. Schwerpunkte der weiteren Ausführungen sind die Bedienung und Anwenderprogrammierung. Hier werden besonders die Betriebsarten, NC-Programmierung und Generierung dargelegt.

# РЕЗЮМЕ

*Badelt, W.; Hauser, S.; Pillat, P.:*

**Оценка параметров при активной и/или пассивной экспериментации с использованием аналоговой и цифровой вычислительной техники**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 98–101

Простые методы оценки параметров, основанные на включении оператора в алгоритм идентификации, станут применимыми путем связи аналоговой с микровычислительной техникой. В статье описаны приборная и программная техники, а также их применение на примере.

*Groll, O.:*

**Оптимизация работы тестомесилки под аспектами техники автоматизации с применением вычислительной машины**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 101–105

При автоматизации традиционных технологических методов для инженера-автоматчика всегда тогда возникают проблемы, когда при разработке этих методов не или только недостаточно учитываются аспекты техники управления. На выбранном примере, на тестомесилке, показано, что инженер-автоматчик должен быть в состоянии предлагать обоснованные технологические изменения для автоматизации этого метода или для его автоматизиции с экономическими оправданными затратами в области техники управления.

*Geitner, G.-H.; Krug, G.:*

**О применении оптимума абсолютной величины для приводов постоянного тока с цифровым регулированием**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 105–111

Отношения, известные для оптимума абсолютной величины при цифровых регуляторах, для оптимизации управления указаны в наглядной закрытой форме. Применение поясняется на примере моделей контуров регулирования и оптимизаций регуляторов для электрических приводов с двигателями постоянного тока.

*Brack, G.; Clemens, F.:*

**О решении динамических уравнений состояния со существенно распределенными величинами состояния**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 111–115

В динамическом уравнении состояния со существенно распределенной величиной состояния $q(z, t)$ она зависит от времени $t$, а также от независимого параметра распределения $z$, а на правой стороне уравнения получается интегральное выражение через $q(z, t)$. Для выработанного ядра этого интеграла решается уравнение, а именно как для непрерывных, так и для дискретизированных координат времени.

*Scholz, A.; Schulz, G.:*

**Структурный анализ систем со многими величинами как предварительная ступень для расчета регуляторов с ограниченной структурой**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 115–119

Представлена простая возможность разложения системы со многими величинами в односторонне связанные частичные системы. Для проверки управляемости и наблюдаемости этих частичных систем рассматривается алгоритм структурного определения уровня. Оба алгоритма базируются на графотеоретических обозначиях. На практическом примере показано, каким образом при помощи структурных предварительных исследований возможно уменьшение затрат на расчет регуляторов.

*Woschni, E.-G.:*

**Выводы повышения ширины обработки микровычислителей при применении „on-line“**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 119–121

С переходом к более высоким ширинам обработки при обработке „on-line“ наряду с ошибками квантизирования и округления необходимо уменьшить также и погрешности вследствие неидеальной программы и ограниченного числа значений ощупывания, погрешности „cut-off“ и „ali'asing“, как исследовано в статье в их взаимной связи. Как вывод между прочим получается, что для динамических проблем с высокой граничной частотой процессоры с более низкой шириной обработки сегодня часто представляют собой более выгодное решение.

*Barth, W.; Müller, K.-J.; Reichel, F.; Zeun, G.:*

**Управление роботами IRS 713**

msr, Berlin 31 (1988) 3, стр. 121–125

В статье представлено управление роботами загрузки типа IRS 713. После пояснения конструктивного построения и периферии следует изображение структуры четырехвычислительной системы, а также содержания аппаратурного обеспечения и функции отдельных модулей, как комплекса регулирования положения и части обслуживания. Основные моменты дальнейших изложений – обслуживание и программирование у потребителя. Здесь изложены в частности режимы, числовое программирование и генерация.

# SUMMARIES

*Badelt, W.; Hauser, S.; Pillat, P.:*

**Parameter Estimation Based on Active and/or Passive Experimentation by Means of Analog and Digital Computers**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 98—101

Simple parameter estimation methods based on the incorporation of an operator into the identification algorithm become practicable due to the coupling of analog computing devices to microcomputers. The authors describe hardware and software means as well as their application to an example.

*Groll, O.:*

**Computer-Aided Optimization of the Functioning of a Bread Dough Dividing and Kneading Machine Under the Viewpoint of Automation**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 101—105

With the automation of traditional technological procedures problems for the automation engineer always arise if the aspects of control have not been sufficiently taken into consideration in the conception of these procedures. By means of a selected example of a bread dough dividing and kneading machine the author shows that the automation engineer must be able to propose founded technological modifications in order to automate the procedure generally or at an expense economically reasonable.

*Geitner, G.-H.; Krug, G.:*

**On the Application of the Absolute Value Optimum for Digitally Controlled Direct Current Drives**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 105—111

The relations known for the servobehavior optimization of digital feedback controllers based upon the optimum in absolute value are given in a clear and condensed representation. The application is explained by means of feedback control loop models and controller optimizations for electrical drives with direct current motors.

*Brack, G.; Clemens, F.:*

**On the Solution of the Dynamic State Equations with Substantially Distributed State Variables**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 111—115

In the dynamic state equation with substantially distributed state variable $q(z, t)$ the latter depends upon the time $t$ and the independent distribution parameter $z$, in the right member of the equation appearing an integral expression over $q(z, t)$. For a degenerate kernel of this integral the equation is solved for both the continuous and the discrete time coordinates.

*Scholz, A.; Schulz, G.:*

**Structural Analysis of Multivariable Systems as a First Step in Calculating Structurally Restricted Controllers**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 115—119

The authors present a simple method for decomposing a multivariable system into partial systems unilaterally coupled. For verifying the controllability and observability of these partial systems an algorithm for structural rank determination is treated. Both algorithms are based on graph-theoretical results. By means of a practical example the authors show how the expense for the controller computation can be reduced by structural preliminary investigation.

*Woschni, E.-G.:*

**Consequences of Increasing the Processing Word Length of Microcomputers in the On-line Application**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 119—121

With the use of larger word length in on-line processing it is necessary to reduce, besides quantization and round-off errors, also errors due to a non-ideal program or limited number of sampled values such as cut-off errors. The author studies these errors in their mutual dependence and concludes, among other things, that for dynamical problems with high cut-off frequency processors of lower processing word length often represent a more favorable solution today.

*Barth, W.; Müller, K.-J.; Reichel, F.; Zeun, G.:*

**Robot control IRS 713**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 121—125

The authors present the charging robot control IRS 713. After having explained the construction and the periphery they treat the structure of the 4-computer-system as well as the hardware and the functions of the individual modules, such as position control and operating part. The operation and application programming form the essential points of the remaining contribution, the operation modes as well as NC programming and generation being particularly dealt with.

# RÉSUMÉS

*Badelt, W.; Hauser, S.; Pillat, P.:*

**Estimation des paramètres basée sur expériences actives et/ou passives à l'aide de calculatrices analogiques et numériques**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 98—101

Les méthodes simples de l'estimation paramétrique basée sur l'incorporation de l'opérateur dans l'algorithme d'identification deviennent practicables grâce au couplage de calculatrices analogiques avec micro-ordinateurs. Les auteurs décrivent les moyens matériel et logiciel ainsi que leur application à un exemple.

*Groll, O.:*

**Optimalisation assistée par ordinateur du fonctionnement d'une machine diviseuse et à pétrir pour la pâte de pain sous les aspects de l'automatisation**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 101—105

Dans l'automatisation de méthodes technologiques traditionnelles, des problèmes pour l'automaticien toujours résultent si des aspects de commande ne sont pas suffisamment considérés dans la conception de ces méthodes. A l'aide d'un exemple choisi d'une machine diviseuse et à pétrir pour la pâte de pain, l'auteur montre que l'automaticien doit être à même de proposer des modifications technologiques qualifiées pour automatiser la méthode en général ou bien à une dépense de commande économiquement raisonnable.

*Geitner, G.-H.; Krug, G.:*

**Sur l'emploi de l'optimum en valeur absolue pour les entraînements à courant continu asservis numériquement**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 105—111

Les relations connues pour l'optimalisation basée sur l'optimum en valeur absolue du servo-comportement des régulateurs numériques sont données dans une représentation claire et condensée. L'emploi est expliqué à l'aide de modèles de boucle de réglage et de l'optimalisations de régulateur pour les entraînements électriques à moteur à courant continu.

*Brack, G.; Clemens, F.:*

**Sur la résolution des équations d'état dynamiques à variables d'état substantiellement distribuées**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 111—115

Dans l'équation d'état dynamique à variable d'état substantiellement distribuée $q(z, t)$, cette variable dépend du temps $t$ et d'un paramètre de distribution indépendant $z$, à la partie droite de l'équation apparaissant une expression intégrale sur $q(z, t)$. Pour un noyau dégénéré de cette intégrale, l'équation est résolue pour coodonnées continues et discrètes.

*Scholz, A.; Schulz, G.:*

**Analyse structurelle de systèmes multivariables comme premier pas dans le calcul de régulateurs limités en structure**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 115—119

Les auteurs présentent une simple approche pour la décomposition d'un système multivariable en systèmes partiels unilatéralement couplés. Pour la vérification de la gouvernabilité et observabilité de ces systèmes partiels, ils traitent un algorithme pour la détermination structurale du rang. Les deux algorithmes sont basés sur des résultats graphe-théoriques. A l'aide d'un exemple pratique, les auteurs montrent comme la dépense pour le calcul du régulateur peut se réduire grâce aux études préliminaires structurelles.

*Woschni, E.-G.:*

**Conséquences d'une augmentation de la longueur de mot de traitement des micro-ordinateurs en emploi en ligne**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 119—121

Par suite de l'utilisation d'une longueur de mot plus grande dans le traitement en ligne, il faut réduire non seulement les erreurs de quantification et les erreurs d'arrondissement mais encore les erreurs causées par un programme non idéal ou un nombre limité de valeurs échantillonnées, p.e. les erreurs par la fréquence limite. L'auteur étudie ces erreurs en leur dépendence mutuelle et conclut, entre autre, que pour les problèmes à haute fréquence limite, des processeurs à longueur plus petite de mot de traitement présentent souvent une solution plus favorable aujourd'hui.

*Barth, W.; Müller, K.-J.; Reichel, F.; Zeun, G.:*

**Commande de robot IRS 713**

msr, Berlin 31 (1988) 3, pp. 121—125

Les auteurs présentent la commande de robot de charge IRS 713. Après avoir expliqué la construction et la périphérie, ils traitent la structure du système à quatre ordinateurs ainsi que le matériel et les fonctions des modules individuels, p.e. la régulation de position et les moyens de manoeuvre. La manoeuvre et la programmation d'application forment les points essentiels du reste de la contribution, les modes de marche ainsi que la programmation NC et la génération étant particulièrement expliqués.

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst „Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] *Dadžion, D.; Mersero, R.:* Cifrovaja obrabotka mnogomernych signalov (Digitale Verarbeitung mehrdimensionaler Signale). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (85).

[2] *Kolovskij, M.; Slousč, A.:* Osnovy dinamiki promyšlennych robotov (Grundlagen der Dynamik industrieller Roboter). Nauka. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (86).

[3] *Kraus, M.; Kučbach, E.; Wošni, E.-G.:* Sbor dannych v upravljajuščich vyčislitel'nych sistemach (Datensammlung in gesteuerten Rechnersystemen). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (87).

[4] *Pricker, A.:* Vvedenie v imitacionnoe modelirovanie i jazyk SLAM II (Einführung in die Simulation und Sprache SLAM II. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (88).

[5] *Curkov, V.:* Dinamičeskie zadači bol'šoj razmernosti (Dynamische Aufgaben großer Dimension). Nauka. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (89).

[6] *Kokoreva, L.; Malašinin, I.:* Dialogovaja sistema v upravlenii naučnymi issledovanijami i razrabotkami (Dialogsystem in der Steuerung wissenschaftlicher Untersuchungen und Entwicklungen). Nauka. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (90).

[7] *Bek, L.:* Vvedenie v sistemnoe programmirovanie (Einführung in die Systemprogrammierung. Übers. aus dem Engl.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (96).

[8] *Virt, N.:* Programmirovanie na jazyke MODULA-2 (Programmierung in der Sprache MODULA-2. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (100).

[9] *Devroj, L.; D'erfi, L.:* Neparametričeskoe ocenivanie plotnosti rapsredelenija (Nichtparametrische Schätzung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (104).

[10] *Dekker, K.; Verver, Ja.:* Ustojčivost' metodov Runge-Kutta dlja žestkich nelinejnych differencial'nych uravnenij (Stabilität der Runge-Kutta-Verfahren für nichtlineare Differentialgleichungen). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (105).

[11] *Dennis, Dž.; Šnabel', R.:* Čislennye metody bezuslovnoj optimizacii i rešenija nelinejnych uravnenij (Numerische Methoden der Optimierung ohne Nebenbedingungen und Lösung nichtlinearer Gleichungen. Übers. aus dem Engl.). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (107).

[12] *Ketkov, J. u.:* Dialog na Bejsike s mini-i mikro-EVM (Dialog mit BASIC für Mini- und Mikrorechner). Nauka. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (109).

[13] Logičeskoe programmirovanie (Logische Programmierung. Übers. aus dem Engl.). Mir. 4. Quart. 1988. NK 87–23 (118).

[14] *Oben, Ž.-P.:* Nelinejnyj analiz i ego ekonomičeskie priloženija (Nichtlineare Analyse und ihre ökonomische Anwendungen. Übers. aus dem Franz.). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (121).

[15] *Oben, Ž.-P.; Ekland, I.:* Prikladnyj nelinejnyj analiz (Angewandte nichtlineare Analyse. Übers. aus dem Engl.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (122).

[16] *Tatt, U.:* Teorija grafov (Graphentheorie. Übers. aus dem Engl.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (130).

[17] *Tennant-Smit, Dž.:* BEJSIK dlja statistikov (BASIC für Statistiker. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (131).

[18] *Traub, Dž.; Vasil'kovskij, G.; Vož'njakoskij, Ch.:* Informacija, neopredelennost', složnost' (Information, Unbestimmtheit, Kompliziertheit. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (132).

[19] *Nakano, E.:* Vvedenie v robototechniku (Einführung in die Robotertechnik. Übers. aus dem Engl.). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (303).

[20] *Bar, R.:* Jayzk ADA v proektirovanii sistem (Die Sprache ADA in der Systemprojektierung. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (304).

[21] *Dao, L.:* Programmirovanie mikroprocessorov 8088 (Programmierung des Mikroprozessors 8088. Übers. aus dem Engl.). Mir. 4. Quart. 1988. NK 87–23 (305).

[22] *Džechani, N.:* Jazyk ADA (Sprache ADA. Übers. aus dem Engl.). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (306).

[23] *Isida, Ch.:* Programmirovanie dlja mikrokomp'juterov (Programmierung für Mikrorechner. Übers. aus dem Jap.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (307).

[24] Iskusstvennyj intellekt. Primenenie v chimii (Künstliche Intelligenz, Anwendung in der Chemie. Übers. aus dem Engl.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (308).

[25] *Morišita, I.:* Apparatnye sredstva mikro EVM (Gerätetechnik der Mikrorechner. Übers. aus dem Jap.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (310).

[26] Postroenie sistem EVM (Entwicklung von Rechnersystemen. Übers. aus dem Jap.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (311).

[27] SBIS dlja EVM (Hyperintegrierte Schaltungen für EDVA. Übers. aus dem Jap.). Mir. Band 1. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (312). Band 2. 4. Quart. 1988. NK 87–23 (313).

[28] *Sibesta, R.:* Strukturnoe programmirovanie na jazyke Assemblera VAX-11 (Strukturelle Programmierung in Assembler – VAX-11. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (314).

[29] *Topchem, D.; C'jung, Ch.:* Juniks i Kseniks (UNIX und XENIX. Übers. aus dem Engl.). Mir. 4. Quart. 1988. NK 87–23 (315).

[30] *Uottenberg, F.:* Programmnoe obespečenie personal'nogo komp'jutera Epl (Programmunterlagen für Personalcomputer Apple. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (316).

[31] *Uejt, M.; Prata, S.; Martin, D.:* Jazyk SI (Sprache C. Übers. aus dem Engl.). Mir. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (317).

[32] *Futi, K.; Sudzuki, N.:* Jazyki programmirovanija i SBIS (Programmiersprachen und VLSI. Übers. aus dem Jap.). Mir. 3. Quart. 1988. NK 87–23 (318).

[33] *Šnajder, A.:* Jazyk ASSEMBLERA dlja personal'nogo komp'jutera firmy IBM (Sprache Assembler für PC der Firma IBM. Übers. aus dem Engl.). Mir. 2. Quart. 1988. NK 87–23 (319).

[34] Jazyk PROLOG v pjatom pokolenii EVM (PROLOG in der 5. Rechnergeneration. Übers. aus dem Engl.). Mir. 4. Quart. 1988. NK 87–23 (321).

[35] *Bichtijarov, A.; Frolov, G.; Omonin, V.:* Sbornik zadač po programmirovanijua na jazyke PL/1 (Sammelband von Aufgaben zur Programmierung in PL/1). Nauka. 1. Quart. 1988. NK 87–23 (503). msr 8768

**messen · steuern · regeln**

**Herausgeber:** Kammer der Technik, Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

**Verlag:** VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, DDR-1020, Telegrammadresse: Technikverlag Berlin; Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn dd

**Verlagsdirektor:** Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*

**Redaktion:** Dr.-Ing. *Dietrich Werner*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870362)
Dr.-Ing. *Jürgen Wede*, Redakteur (Telefon: 2870374)

**Gestaltung:** *Karen Wohlgemuth* (Telefon: 2870288)

**Lizenz-Nr:** 1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik

**AN (EDV):** 15936

**Erscheinungsweise:** monatlich 1 Heft

**Heftpreis:** 4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebs BUCHEXPORT zu entnehmen.

**Gesamtherstellung:** VEB Druckerei „Thomas Müntzer", Bad Langensalza, 5820

**Anzeigenannahme:** Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, 1020. Anzeigenpreisliste Nr. 7; Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR-1157

**Erfüllungsort und Gerichtsstand:** Berlin-Mitte. **Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in andere Sprachen vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.**

**Bezugsmöglichkeiten:**

**DDR** sämtliche Postämter

**SVR Albanien:** Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propagandit te Librit Bruga Konference e Pezes, Tirana

**VR Bulgarien:** Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia

**VR China:** China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88, Beijing

**ČSSR:** PNS — Ústřední Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezska 11, 12000 Praha 2; PNS, Ústredná Expedicia a Dovoz Tlače, Posta 002 88547 Bratislava

**SFR Jugoslawien:** Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarako Produzeče MLADOST, Ilica 30, Zagreb

**Koreanische DVR:** CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang

**Republik Kuba:** Empresa de Comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana

**VR Polen:** C.K.P. i.W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa

**SR Rumänien:** D.E.P. Bukureşti, Piaţa Scienteii, Bukureşti

**UdSSR:** Städtische Abteilungen von Sojuzpečat oder Postämter und Postkontore

**Ungarische VR:** P.K.H.I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P.O. Box 16, 1426 Budapest

**SR Vietnam:** XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi

**BRD und Berlin (West):** ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30

**Österreich:** Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge

**Schweiz:** Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich

**Alle anderen Länder:** örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Postfach 160, Leipzig, DDR-7010 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR-7010

## Abnahmebedingungen

Die Redaktion veröffentlicht nur solche Beiträge, die noch an keiner anderen Stelle des In- und Auslandes in dieser Form erschienen sind oder bis zur Veröffentlichung erscheinen werden und die die Verfasser bis zum Ablauf des ersten, dem Erscheinen folgenden vollen Kalenderjahres an keiner anderen Stelle veröffentlichen, ohne hierzu vorher die Zustimmung der Redaktion der Zeitschrift eingeholt zu haben. Mit der Abnahme und Veröffentlichung des Manuskriptes geht das ausschließliche Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder auf den Verlag über. Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Redaktion nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme u. a. von Heften der Zeitschrift, einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen. Ferner behält sich die Redaktion Änderungsvorschläge nach der Durcharbeitung der Beiträge vor. Beiträge müssen eine Kopie der Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes bzw. der Institution enthalten.
Richtlinien für die Manuskriptgestaltung sind dem Heft 1 (S. 28) messen · steuern · regeln 1988 zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung dieser Gesichtspunkte garantiert eine sofortige Bearbeitung und verzögerungsfreie Veröffentlichung der Arbeit in der Zeitschrift.

## Internationales Problemseminar CCHSC

Vom 10. bis 14. Oktober 1988 veranstalten das Institut für Informatik und Rechentechnik der AdW und die Gesellschaft für Informatik der DDR gemeinsam das Problemseminar „Compiler Compiler and High Speed Compilation" (CCHSC) als Nachfolgeseminar zu „Compiler Compiler and Incremental Compilation", 1986 (msr berichtete darüber im H. 4/1987).

Die moderne Programmentwicklung erfordert die Anwendung interaktiver Techniken. Während der Fehlersuche und des Hauptteils des Lebenszyklusses eines Programms sind viele kleine Änderungen erforderlich. In komplexen Programmsystemen in modernen Programmiersprachen mit separater Compilierung, wie ADA, MODULA-2 oder CHILL, können diese Änderungen sehr viel Zeit beanspruchen. Durch High-Speed-Compiler oder inkrementale Compilertechnik können diese Zeiten verringert werden. Die Veranstalter verfolgen mit dem Seminar das Ziel, systematisch die Probleme, die mit der High-Speed-Compilierung in allen Compilierungsphasen und der Entwicklung von Compiler-Generatoren verbunden sind, darzustellen.

Die Veranstaltung gliedert sich in folgende Schwerpunkte:

1. Übersichtsbeiträge — Allgemeine Forderungen, Eigenschaften und theoretische Aspekte von Compiler-Generatoren und der High-Speed-Compilierung
2. Überblick über Systeme — Allgemeine Prinzipien und Eigenschaften existierender Systeme und Kooperation von Systemkomponenten
3. Komponenten und Systeme im Detail — Lexikalische, syntaktische, semantische Analyse, Fehlerbehandlung, zwischensprachliche Repräsentation, Kodegenerierung, Optimierung, Linking und Loading, Programmierumgebung (Editor, Debugger usw.)
4. Anwendungen
5. Demonstrationen (Es wird auf IBM-XT-kompatible Rechner orientiert.)

Die Arbeitssprache der Veranstaltung ist Englisch.

**Teilnahmegebühr:** 300,— M für Teilnehmer aus sozialistischen Ländern bzw. 300,— DM (einschließlich Tagungsmaterialien und Exkursion)

**Termine:**

30. April 1988 Kurzfassungen von Beiträgen (maximal 200 Wörter, reproduzierbare Form)

30. Juni 1988 Mitteilung über Annahme

15. August 1988 Überweisung der Teilnahmegebühr

15. Oktober 1988 Beitrag in Langform (maximal 15 Seiten, reproduzierbare Form)

Anfragen sind zu richten an:

Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Informatik und Rechentechnik
CCHSC-Organisationskomittee
M. Albinus
Rudower Chaussee 5
Berlin
DDR-1199

## TEMPERATUR '89

Im Oktober 1989 findet in Suhl die nächste wissenschaftlich-technische Fachtagung dieser Veranstaltungsreihe zur Temperatur- und thermischen Meßtechnik statt. Sie wird vom Fachunterausschuß Temperaturmeßtechnik der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik der KDT in Verbindung mit dem ASMW zusammen mit dem Bezirksverband Suhl der KDT organisiert.

Für das wissenschaftliche Tagungsprogramm sind folgende thematischen Schwerpunkte vorgesehen:

- Grundlagen der Temperaturmeßtechnik und thermischer Messungen
- Entwicklung und Einsatz neuer Temperatursensoren, Anwendung bisher nicht genutzter physikalischer Wirkprinzipien
- Kalibration von Temperatursensoren und Temperaturmeßgeräten
- Strahlungstemperaturmeßtechnik und Thermografie
- Bestimmung des Emissionsgrades und Berücksichtigung seines Einflusses
- Optische, spektroskopische und akustische Temperaturmeßverfahren
- Temperaturmessungen in verschiedenen Industriezweigen, speziell in der Metallurgie
- Anwendung von Temperaturmessungen für die Qualitätssicherung
- Temperatur- und thermische Messungen in Biologie, Biotechnik, Agrartechnik und Medizin
- Messung thermophysikalischer Stoffeigenschaften
- Messung von Wärmemengen, Wärmeströmen und Wärmestromdichten
- Messung besonders hoher und tiefer Temperaturen, Temperaturmessung unter extremen Bedingungen
- Entwicklung von Temperaturmeßgeräten und Einsatzerfahrungen, Einsatz von Mikrorechnern, intelligente Meßgeräte
- Standardisierung von Temperaturmeßgeräten und thermischen Meßverfahren.

Dabei sollen sowohl theoretische Arbeiten als auch Anwendungsbeispiele und praktische Problemlösungen, Übersichtsvorträge und Spezialbeiträge berücksichtigt werden.

Vortragsanmeldungen werden mit 3 Kurzfassungen (Umfang 1 bis 2 Seiten) bis zum 17. Dezember 1988 erbeten an:
Dozent Dr.-Ing. *F. Bernhard*
Technische Hochschule Ilmenau
Postfach 327
Ilmenau
6300.

Anfragen zur Teilnahme an der Fachtagung können gerichtet werden an:
Dipl.-Ing. *U. Hartung*
Bezirksverband Suhl der KDT
Bereich Wissenschaft und Technik
Straße der OdF
Suhl
6000.

## Messen, Steuern, Regeln mit elektronischen Bauelementen aus dem VEB Kombinat Mikroelektronik

Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik sind wesentliche Anwendungsgebiete moderner Mikroelektronik, sichert doch gerade die hochentwickelte Mikroelektronik Effizienz und Präzision.

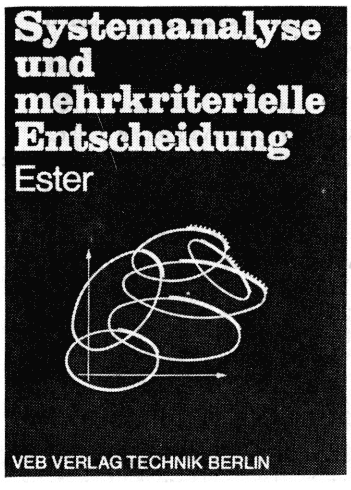
Der VEB Kombinat Mikroelektronik liefert dazu ein großes und leistungsfähiges Sortiment elektronischer Bauelemente, das neben zahlreichen Applikationsbeispielen auf der Leipziger Frühjahrsmesse 1988 in der Halle 15 vorgestellt wird. Für nahezu alle Aufgaben stehen geeignete Bauelemente der Mikro-, Opto- und Leistungselektronik bereit. Das Produktionsprogramm des Kombinates enthält Mikroprozessoren mit Verarbeitungsbreiten bis 16 bit, Einchipmikrorechner, hochintegrierte Speicherschaltkreise, Zähler, Ein- und Ausgabeschaltkreise, AD/DA-Wandler, Operationsverstärker, Analog- und Digitalprozessoren, Ansteuerschaltkreise, Sensoren und Koppler, Fotodioden, Infrarot- und Lichtemitterdioden, Flüssigkristallanzeigen, Lichtschachtbauelemente, Si-Transistoren und Leistungstransistoren, Si-Dioden und Leistungsdioden, Gleichrichterdioden und Freiflächengleichrichter. Das Lieferangebot umfaßt nahezu 1500 Grundtypen aktiver elektronischer Bauelemente.

Digitale Meßtechnik (Multimeter, Handmultimeter, Zähler u. a.) mit einem breiten Einsatzbereich ergänzen die Erzeugnispalette. Als kompetenter und leistungsstarker Partner in Sachen Zeitmeßtechnik präsentiert sich der VEB Kombinat Mikroelektronik als Hersteller hochpräziser quarzgesteuerter sowie mechanischer Industrieschaltuhren für viele Anwendungen, Marinechronometern und einer großen Uhrenkollektion, die in Funktionalität und Design überzeugen.

ISSN 0026-0347, mess., steuern, r
Berlin 31 (1988) 3, S. 97—144

19960 3
APW
4073 (001 1910
159 549 964
SHAT 11


# Im Fachbuchhandel erhältlich




**Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung**

Von Dr. sc. techn. Jochen Ester

1. Auflage. 216 Seiten, 157 Bilder, 15 Tafeln, Kunstleder, DDR 28,— M, Ausland 38,— DM. Bestellangaben: 5537274/Ester, Entscheidung

Die Polyoptimierung wird in die umfassendere Problematik der rechnergestützten mehrkriteriellen Entscheidungshilfsmittel eingebettet. Erstmalig werden die Beziehungen zwischen Entscheidungsfindung und modernen Konzeptionen der Systemtheorie (z. B. Fuzzy-Systeme) geschlossen dargestellt. Dabei wird eine Brücke geschlagen zwischen den heuristischen, ingenieurmäßigen Verfahren und den streng mathematischen Verfahren. Für den mathematisch weniger Geübten werden weitergehende Erläuterungen gegeben. Die Anwendungen dienen der Illustration der behandelten Methoden; sie zeigen, welche Effekte durch zweckmäßige Auswahl der Methoden erzielt werden können und auf wieviel verschiedenen Gebieten die mehrkriterielle Betrachtungsweise angewandt werden kann. Die Anwendung dieser Methoden hat große Bedeutung für die Volkswirtschaft.

Gliederung des Buches: Einführung · Der Kompromiß — Hauptproblem der mehrkriteriellen Entscheidung · Formale Beschreibung des Problems · Grundsätzliche Lösungswege · Theoretische Grundlagen · Ermittlung der Paretomenge · Entscheidungshilfen — Decision Support Systems · Anwendungen · Zusammenfassung und Ausblick.

VEB
VERLAG
TECHNIK
BERLIN

**Werkstoffkunde für die Elektrotechnik und Elektronik**

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Dr. phil. Lothar Hahn und Chem.-Ing. Irene Munke

4., unveränderte Auflage. 520 Seiten, 228 Bilder, 224 Tafeln, Leinen, DDR 30,— M, Ausland 44,— DM. Bestellangaben: 5530865/Hahn, Werkstoffkunde

Immer mehr Werkstoffe und Verarbeitungstechnologien werden zur Herstellung von Erzeugnissen der Elektrotechnik und Elektronik benötigt. Zur Verwirklichung eines technisch und ökonomisch optimalen Werkstoffeinsatzes ist es notwendig, daß die seitens des Anwenders gestellten technischen Anforderungen an die Werkstoffe, die vorhandenen Werkstoffparameter, die Verarbeitungsmöglichkeiten, der Energieaufwand bei der Herstellung und beim Betreiben sowie die Kosten des Finalerzeugnisses im Zusammenhang betrachtet werden. Dieser Sachverhalt erfordert eine spezielle Werkstoffkunde für die Elektrotechnik und Elektronik.

Gliederung des Buches: Mikroeigenschaften der Werkstoffe · Makroeigenschaften der Werkstoffe · Werkstoffe unter Umwelteinflüssen · Leiterwerkstoffe · Halbleiter · Kontaktwerkstoffe · Widerstandswerkstoffe · Magnetische Werkstoffe · Isolierstoffe der Elektrotechnik · Ferroelektrika · Werkstoffe der Vakuum-, der Hochtemperatur- und der Tieftemperaturtechnik · Werkstoffe der Optoelektronik.